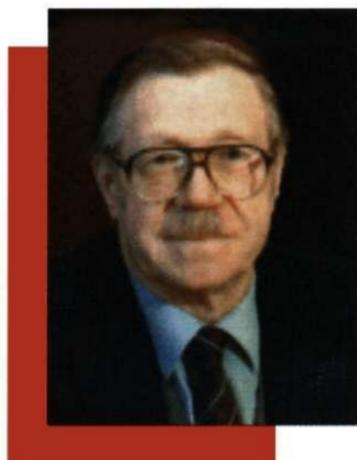


**ТВОРЦЫ
ЯДЕРНОГО
ВЕКА**



Ф.М.МИТЕНКОВ



**ТВОРЦЫ
ЯДЕРНОГО
ВЕКА**

Ф.М. Митенков

*Размышления
о пережитом*

Москва

Изд **АТ**

2004

УДК 621.039.5 (092)
М 66
ББК 6П2.8 (09 Митенков)

М 66 Митенков Ф.М.

Размышления о пережитом. — М.: ИздАТ, 2004. — с. 400, илл. —
(Творцы ядерного века)

ISBN 5-86656-168-9

25 ноября 2004 года исполняется 80 лет академику РАН, Герою Социалистического Труда, Лауреату Ленинской и Государственных премий СССР, Лауреату премии «Глобальная энергия» Федору Михайловичу Митенкову.

Приуроченный к этому событию выпуск из серии «Творцы ядерного века» содержит автобиографический очерк, размышления автора о работе в «родном» ОКБМ, о развитии атомной энергетики и возрождении страны, избранные доклады и статьи, отражающие разные направления деятельности юбиляра, а также воспоминания коллег о совместной работе с ним.

УДК 621.039.5 (092)
ББК 6П2.8 (09 Митенков)

ISBN 5-86656-168-9

© Митенков Ф.М., 2004
© Оформление ИздАТ, 2004

Краткие биографические данные Федора Михайловича Митенкова:

Родился 25 ноября 1924 г. в семье медфельшера в селе Ключи Саратовской области.

1931-1941 гг. –учеба в школе.

1941-1950 гг. –учеба в Саратовском государственном университете им. Н.Г.Чернышевского.

1941-1946 гг. –служба в Советской армии, участие в Великой Отечественной Войне

1946-1948 гг. – учеба во Всесоюзном заочном юридическом институте.

1950-1964 гг. –ОКБ Горьковского машиностроительного завода.
Инженер-конструктор – начальник отдела.

1964-1997 гг. –ОКБМ. Начальник отдела, зам.начальника –главного конструктора, начальник – главный конструктор, генеральный конструктор, директор.

с 1997 г. – по настоящее время – научный руководитель ОКБМ.

1959 г. – Кандидат технических наук.

1967 г. – Доктор технических наук.

1968 г. – Профессор Горьковского политехнического института.

1979 г. – Член-корреспондент АН СССР

1990 г. – Академик АН СССР (в настоящее время – РАН)

Предисловие автора

Предлагаемая читателю книга обязана своим появлением стремлению автора переосмыслить пережитое в свете кардинальных изменений, которые переживает наша страна во всех сферах жизнедеятельности в течение последних полутора десятилетий.

Более пятидесяти лет своей производственной деятельности автор находился непосредственно в гуще событий, связанных с решением грандиозной научно-технической проблемы, имевшей жизненно важное значение для страны – *атомной проблемы*.

Весь творческий производственный путь автора прошел в коллективе Особого конструкторского бюро (ОКБ) при Горьковском машиностроительном заводе. Это бюро позднее стало самостоятельным предприятием под названием Опытное конструкторское бюро машиностроения (ОКБМ). За годы своей работы автор прошел путь от инженера-конструктора до директора-генерального конструктора, а затем – научного руководителя ОКБМ.

Все годы своего существования коллектив ОКБМ занимался разработкой проектов различных технических систем и отдельных видов оборудования, необходимых для решения атомной проблемы, а также созданием атомных энергоисточников на основе ядерных реакторов для различных потребителей.

Автор имел возможность детально знакомиться, анализировать и непосредственно участвовать в организации работ по проектам различного назначения и убежден, что накопленный в стране опыт решения сложных научно-технических проблем заслуживает тщательного изучения, а полученные результаты будут полезны и в новых условиях, в частности, при поиске наиболее эффективных путей и средств для возрождения экономики страны, преодоления затянувшегося кризисного состояния.

Размышлениям автора, несомненно, присуща субъективность, и он не рассчитывает на их абсолютность. Автор будет вполне удовлетворен, если его книга пробудит у читателя желание определить по какому-либо вопросу из рассмотренных в книге свое собственное представление или суждение.

Автор считает своим приятным долгом выразить признательность всем, кто счел возможным прислать свои воспоминания о многолетнем рабочем сотрудничестве со мной и коллективом ОКБМ.

Хочу также поблагодарить за эффективную помощь при написании книги сотрудников ОКБМ Е.В. Кусмарцева и А.Л. Берензона .

Введение

По-видимому, каждый человек на склоне лет испытывает в той или иной мере потребность оглянуться назад, осмыслить пройденный путь, отдельные события и факты, свое поведение в каких-то конкретных ситуациях. Результаты такого анализа, по моему мнению, и составляют основу того, что принято называть жизненным опытом, который каждым из нас передается сознательно или бессознательно в различных формах нашим близким и окружению. Если же человек набирается мужества, терпения и берется за перо, чтобы зафиксировать свои размышления, то это уже приобретает общественную значимость.

Следует иметь в виду, что ретроспективный анализ аналогичен прохождению в обратном направлении ранее пройденного пути. Туристам хорошо известно, что восприятия пути в прямом и обратном направлениях не совпадают. Поэтому не следует думать, что такой анализ позволит составить истинное представление о тех или иных событиях и процессах. Тем более что на результатах анализа неизбежно сказывается субъективный фактор, отражающий мировоззрение автора, широту его кругозора, этические предпочтения, которые не остаются постоянными.

Несмотря на эти предостережения, я склонен считать, что результаты жизненного анализа, при всей их условности, в совокупности, без сомнения, относятся к числу исторических источников, поскольку они помогают в какой-то мере последующим исследователям приблизиться к пониманию соответствующего исторического этапа, действующих на этом этапе общественных сил, процессов, значимости тех или иных конкретных событий. Здесь проявляется полная аналогия с рекой, которая становится сама собой, только впитав большое количество ручейков и ручьев, каждый из которых только условно можно считать или не считать началом реки. Однако на самом деле началом реки является вся совокупность ручейков. А в рассматриваемом нами случае — вся совокупность исторических материалов, доступных для исследователей.

Мое поколение прожило жизнь, насыщенную разнообразными, в том числе и масштабными в историческом смысле событиями. В XX столетии наша страна прошла через три войны, две из них — мировые, через две революции, через разрушительную во всех отношениях гражданскую войну, пережила две мучительные глобальные перестройки, ввергавших страну в тяжелейшие кризисные состояния.

Процесс преодоления многолетнего кризисного состояния, вызванного последней перестройкой, сейчас еще продолжается, характер и сроки его завершения пока не просматриваются.

Несомненно, что богатый для нашей Родины событиями исторического масштаба XX век будет объектом всестороннего изучения учеными последующих поколений. Есть основания думать, что их приближение к пониманию нашего времени будет более объективным, полным и адекватным, чем у современников. Этому будут способствовать все исторические источники, включая и записки, воспоминания и суждения современников по разным поводам, которые дойдут до будущих исследователей.

Я лшу себя надеждой, что и мои записки могут представлять некоторый интерес для людей, склонных к осмыслению настоящего через анализ прошлого. Однако считаю необходимым пояснить, что главным стимулом для написания этих записок было стремление обобщить свой опыт организации творческого научно-производственного коллектива и обеспечения его эффективной деятельности. Мне представляется, что накопленный ОКБМ опыт решения нестандартных организационных задач по созданию оптимальных условий для развития творческого потенциала коллектива и его максимального проявления в различных ситуациях актуален для нашей страны не только сегодня, но будет востребован и завтра с учетом, конечно, изменяющихся конкретных условий и задач.

Учитывая отмеченную ранее значимость субъективного фактора при описании и анализе прошлого (особенно участниками описываемых событий), я счел целесообразным привести краткую информацию о своей юности до прихода в ОКБ с целью дать читателю возможность составить свое мнение об условиях, в которых складывалось мое миропонимание в большом и малом.

Я полагаю, что именно в детстве и юности формируются некоторые черты характера, психологии, механизмы выработки суждений, мировоззренческие основы, которые в дальнейшем в значительной степени определяют у каждого из нас восприятие и суждения о событиях, в которых мы либо участники, либо наблюдатели, либо получатели какой-то информации.

Автобиографический очерк

Родился я 25 ноября 1924 года в селе Ключи Саратовской области, где в свое время в крестьянских семьях родились и начинали свой жизненный путь и мои родители.

Отец мой, Митенков Михаил Сергеевич, окончил церковно-приходскую школу. Будучи призван незадолго перед Первой мировой войной в царскую армию, он был направлен в армейское медицинское училище, которое и закончил, получив квалификацию медицинского фельдшера. Вся дальнейшая его жизнь была связана с медициной.

Моя мать, Евдокия Захаровна (в девичестве – Давыдова), была из семьи староверов и строго придерживалась этой веры всю свою жизнь, никакого образования не имела. Я был третьим ребенком в семье (два сына, две дочери).

Насколько я помню, семья всегда очень сильно материально нуждалась. Кормилец был только один – отец.

Экономическое и социальное положение в стране в пору моего детства определялось разрухой после многолетней Гражданской войны, социальными потрясениями при перестройках, связанных с коллективизацией в деревне и индустриализацией страны, с голодом в Поволжье и на Украине.

Для меня до сей поры остается совершенно непонятным, как родителям удавалось сводить концы с концами, тем более что они отличались такой добродетелью как помощь ближнему. В голодные годы в Поволжье родственники часто обращались к ним за помощью, и мать всегда находила возможность чем-то помочь, не допускала отказа. А когда родственники уходили, она крестила их и как будто про себя говорила: «Помочь голодающим – дело святое, богоугодное». Я и сейчас отчетливо вижу мать, произносящей эти слова. Правда, сейчас я думаю, что мать как бы оправдывала себя за то, что ей пришлось оторвать что-то у своей семьи, отнюдь не сытой, чтобы помочь совсем голодному. Много лет прошло с тех пор, но эти сцены из памяти не стираются.

Меня не перестает и сейчас удивлять, что в этих сложнейших условиях отец определил для себя цель — дать своим детям достаточное образование. Всю свою последующую жизнь он подчинил этой цели. И не раз в дальнейшем мне приходилось слышать, как отец, обсуждая какую-либо особенно трудную ситуацию с семейным бюджетом, заканчивал словами: «Мать, как бы трудно ни было, дети должны учиться. Мы должны найти выход». И ведь находили!

Учебу я начал в сельской школе с.Елшанка Саратовской области в 1930 году, когда мне не было еще и шести лет, увязавшись за сестрой, которая была старше меня на два года. Мать пыталась протестовать, но директриса школы посоветовала ей не препятствовать: «Пусть ходит, если хочет. Надоест — сам перестанет». Но мне понравилось в школе, и я успешно учился.

В конце 1933 года, когда я уже перешел в четвертый класс, отец, следуя поставленной цели, принял решение переехать в г.Саратов, где, как он убеждал мать, дети смогут учиться и в школе, и в институте без отрыва от дома, от семьи.

Переход в городскую школу для меня лично был весьма важным событием, поскольку обстановка там сильно отличалась от спокойной, напоминающей домашнюю, обстановки в сельской школе. Первые месяцы учебы в городской школе, по-видимому, имели некоторые психологические последствия, которые в дальнейшем переросли в особенности моего характера (некоторая замкнутость, затрудненная коммуникабельность и др.). По сравнению с сельской школой, в городской была довольно хорошая библиотека. Я пристрастился к чтению, стремился побыстрее сделать домашние задания, чтобы больше времени оставалось для чтения. Дело доходило до того, что мать отбирала у меня книги, выключала свет. У меня сложилось впечатление, что большую часть знаний, наиболее интересных, я получал в те годы не из учебников, а из прочитанных книг.

В 1941 году я с отличием окончил среднюю школу и готовился поступать в Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского, но затруднялся с выбором факультета. Физико-математический факультет меня привлекал логической строгостью и стройностью изучаемых дисциплин, а историко-филологический — обширностью информации по общественным событиям, становлению и развитию культуры; кроме того, в какой-то мере при выборе факультета сказывались и мои ученические попытки писать стихи и рассказы.

Но жизнь проблему выбора факультета решила по-своему. 22 июня 1941 года началась Великая Отечественная война. Вместо университета я с близкими друзьями-однокашниками пошел в райвоенкомат, где мы встали в очередь, чтобы нас зачислили в армию и отправили на

фронт. Райвоенком на мою просьбу отреагировал так: «Тебе, друг, только 16 лет. Жди, и до тебя дойдет очередь, не забудем».

Мне было крайне обидно, тем более что мои друзья, которые были на два года старше меня и уже закончили учебу в аэроклубе, были оформлены немедленно и получили направление в авиационное училище.

Учиться в университете мне расхотелось, но по настоянию отца я пошел в университет и оформился на физико-математический факультет. После окончания первого курса, в августе 1942 года, меня наконец-то призвали в армию и направили в училище младших командиров войск НКВД, по окончании которого я продолжал службу в различных подразделениях войск НКВД.

Демобилизовался я из армии в июле 1946 года в соответствии с Указом Президиума Верховного Совета СССР как студент второго курса университета. Для продолжения учебы в университете я был оформлен на второй курс физического факультета (физико-математический факультет был разделен на два самостоятельных факультета: физический и механико-математический).

Материальное положение семьи было в эти годы весьма тяжелым. Отец к этому времени тоже был демобилизован из армии, а его здоровье оставляло желать лучшего. Поэтому у меня не было уверенности, что ему будет по силам содержать меня и мою младшую сестру еще четыре года, хотя и он, и мать горячо приветствовали мое желание продолжать учебу в университете. Но моей стипендии, хотя и повышенной, явно было недостаточно для самообеспечения.

Поэтому я принял нестандартное решение: одновременно с учебой в университете прослушать полный курс в Юридическом институте и получить полагающийся диплом юриста. При этом я рассчитывал на то, что мне удастся пройти весь курс обучения за более короткий срок, чем это было предусмотрено официальной учебной программой, с которой я детально ознакомился. Основанием для таких надежд явилось то, что после ознакомления с учебной программой Юридического института у меня сложилось впечатление, что по ряду дисциплин, входящих в программу, я уже имел некоторый запас знаний, а умение работать с книгой, постоянный интерес к истории, философии и уверенность в своей работоспособности вселяли оптимизм относительно возможностей изучения специальных дисциплин. Производственную практику в прокуратуре я надеялся совместить с летними каникулами в университете. Я полагал, что при наличии диплома юриста, если жизненные обстоятельства не позволят мне завершить учебу в университете, я смогу устроиться на работу, связанную с юриспруденцией.

Мое заявление было удовлетворено, и я был зачислен студентом Всесоюзного Заочного юридического института с сентября 1946 г.

Полный курс я закончил в 1948 г. и получил диплом юриста. Правда, фактический сокращенный срок обучения послужил причиной разбирательства специальной комиссии из Москвы, которая, однако, не выявила каких-либо нарушений со стороны руководства института.

В университете обучение у меня шло нормально, хотя по ряду курсов я предпочитал самостоятельную работу с книгами и довольно много лекций пропускал. Замечаний по этому поводу мне не делали, поскольку большинство экзаменов я сдавал досрочно, получая высшие баллы.

После получения диплома юриста я имел разговор с отцом о том, что могу устроиться на работу, но придется покинуть университет или перейти на заочное обучение, если работа позволит. Отец довольно долго обдумывал мое предложение, но в конце концов сказал: «Давай, сын, поднатужимся и кончим университет нормально, как положено».

Должен заметить, что прежде чем говорить с отцом, я имел беседу с районным прокурором — умной, деловой женщиной, под началом которой я проходил практику. Она сказала, что, безусловно, поможет мне с устройством на работу, однако считает, что если имеется малейшая возможность закончить учебу на физическом факультете университета, то ею надо воспользоваться. Относительно заочного обучения она выразила сомнение, заявив, что работа юриста в любом статусе практически этого не допустит. Кроме того, она сказала: «В наше время занятия юриспруденцией в любом качестве не относятся по многим причинам к числу престижных. А если ты склонен к творческой работе, то тебя ждет глубокое разочарование».

Учитывая эти соображения умной женщины, настроенной ко мне благожелательно, а также с учетом позиции отца, я принял решение продолжить обучение в университете, о чем сообщил отцу, который был этим весьма доволен. А я в который раз удивился самоотверженности, последовательности, упорству отца в достижении целей, которые он перед собой когда-то поставил, — дать своим детям высшее образование. По-видимому, его пример в какой-то степени сказался и на мне, когда со временем я сформулировал для себя ряд принципиальных положений, которые использовал всю свою сознательную жизнь, а именно:

- безвыходных ситуаций не бывает;
- если есть задача, то есть и ее решение;
- дорогу осиливает только идущий.

Интенсивные занятия в двух вузах при стесненном материальном положении семьи не прошли для меня бесследно. В 1948 году я серьезно заболел, обнаружился туберкулез легких, мне наложили пневмоторакс, но это не сказалось на моей учебе. Я ни в коей мере не чувствовал себя инвалидом и не допускал мысли, что ко мне имеют отношение слова

известного романса: «Я чахоткою страдаю, / Скоро-скоро я умру...». Правда, по настоянию матери в моем ежедневном меню появились такие новшества, как рыбий жир, черная редька, иногда — козье молоко.

На четвертом курсе меня привлек к научной работе профессор Степухович Александр Давыдович, который читал на физическом факультете курс статистической физики, читал талантливо, увлекал слушателей и сам увлекался. Поэтому у него хронически не хватало времени. Он назначал дополнительные часы, и студенты аккуратно их посещали. Его научной специализацией была химическая физика. В своих исследованиях он ориентировался на работы академика Н.Н. Семенова (позднее — лауреата Нобелевской премии). По результатам теоретических и экспериментальных работ, которые я выполнил под руководством А.Д. Степуховича, мною были подготовлены три статьи, опубликованные в журнале «Физическая химия» в 1951 г., в журнале «Общая химия» в 1953 г. и в сборнике статей по общей химии, изданном АН СССР в 1955 г.

По окончании обучения А.Д. Степухович предложил мне поступить к нему в аспирантуру. Я охотно согласился, поскольку к этому времени довольно глубоко погрузился в задачи химической физики. В это время появился русский перевод книги П.Л. Полинга «Квантовая химия», которая добротнo продемонстрировала существенное расширение возможностей решения задач химической физики за счет использования аппарата квантовой механики.

Однако с аспирантурой возникли трудности, как потом оказалось, непреодолимые. Хотя я сдал вступительные экзамены, официальное зачисление застопорилось. Дело было в том, что ко времени окончания нами пятого курса из Москвы приезжала специальная комиссия, которая отобрала часть выпускников-физиков без собеседования с ними, ориентируясь только на анкетные данные. По завершении работы комиссия передала ректору список выпускников, которых он не вправе распределять по заявкам ведомств. В этот список попала и моя фамилия. Как я узнал уже значительно позже, по этому списку выпускники направлялись в распоряжение Первого Главного управления (позднее было преобразовано в Министерство среднего машиностроения), в ведении которого находилась атомная промышленность.

Несмотря на это предписание, ректор университета решился уступить настойчивым усилиям профессора А.Д. Степуховича, и я был зачислен в аспирантуру, за что позднее ректор получил то ли замечание, то ли выговор от Министра высшего образования. Мне же пришлось проститься с аспирантурой и начать свою производственную деятельность в соответствии с распределением по линии Первого Главного управления.

О работе в ОКБ–ОКБМ

Первые шаги

При окончательном распределении решением Первого Главного управления я был направлен в г. Горький (ныне Н. Новгород) на знаменитый в то время Горьковский машиностроительный завод для работы в Особом конструкторском бюро (ОКБ)*. Директором завода и начальником ОКБ был Елян А.С. Этот завод и его директор прославились тем, что во время войны изготовили и поставили на фронт 100 000 артиллерийских систем. Прибыл я в г. Горький 7 ноября 1950 г., настроение было подавленное. И причину этого нетрудно понять.

В университете я готовил себя к научной работе. Начиная с четвертого курса попробовал себя и в теоретических, и в экспериментальных исследованиях под руководством талантливого руководителя, почувствовал в какой-то степени вкус к такой работе. Зачисление в аспирантуру утвердило меня и моих близких во мнении, что жизненный путь определен. И вдруг все это в одночасье рухнуло. Работать на заводе я чувствовал себя совершенно не подготовленным. В учебных университетских программах для физического факультета не предусматривалось никаких курсов, за исключением, может быть, начертательной геометрии, которые, как мне тогда казалось, могли

* О развитии и производственной деятельности ОКБ–ОКБМ имеется довольно много печатной информации. В частности, книга большого авторского коллектива «Полвека в атомном машиностроении», подготовленная к полувековому юбилею предприятия; ряд персональных публикаций об отдельных производственных фактах, событиях, а также воспоминания сотрудников. Я не собираюсь повторять в целом известную информацию, а коснусь только тех фактов и событий, которые необходимы для последовательного изложения моих представлений о динамике развития ОКБ и понимания основных выводов, к которым я пришел в настоящее время, осмысливая опыт становления, развития ОКБМ и результаты его деятельности

бы иметь какое-либо отношение к потребностям, нуждам, задачам машиностроительного завода.

При первой встрече с Главным конструктором ОКБ Анатолием Ивановичем Савиным (ныне академиком РАН), мне был задан вопрос, чем я предпочитаю заниматься: рисованием или расчетами. Слово «рисование» меня буквально испугало, потому что никакого умения рисовать и никакой склонности к рисованию у меня не было. Поэтому я категорически от рисования отказался. Правда, вскоре выяснилось, что под словом «рисовать» в ОКБ имеют в виду техническое черчение.

Я заявил Анатолию Ивановичу, что предпочитаю заниматься задачами, требующими знания и использования математики. Он сказал «Быть посему» и направил меня в подразделение, которое занималось разработкой проектов диффузионных машин.

Войдя в рабочий контакт с конструкторами, я довольно скоро понял, что для активного и инициативного сотрудничества с ними мне крайне необходимо пополнить свои знания в таких научных дисциплинах, как материаловедение, сопротивление материалов, техническая механика, теория управления. Я составил для себя рабочий план, набрал в заводской библиотеке подходящую литературу. Кстати, заводская библиотека по тем временам имела достаточно хороший набор технической литературы. Я обязал себя ежедневно усваивать определенные разделы и вскоре убедился, что университетская программа физического факультета позволяет мне продвигаться в освоении технических дисциплин без особых затруднений.

В то время диффузионные машины создавались в целях сооружения специальных заводов по обогащению естественного урана делящимся изотопом урана U-235. Каждая машина составляла ступень каскада, который включал большое число ступеней. Схема машины (ступени) включала компрессоры полного и половинного расходов, делитель и холодильник. В качестве рабочей среды использовалось соединение UF_6 в газообразной форме.

Для нормальной работы каждой ступени в каскаде необходимо было обеспечить при заданном расходе определенный перепад давления в делителе, а это условие определяло требования к гидравлическим характеристикам компрессоров. При этом весьма важной характеристикой являлась электрическая мощность, потребляемая ступенью. Это было обусловлено большим числом ступеней в каскаде. Поэтому суммарная мощность, потребляемая ступенью, относилась к числу определяющих характеристик.

Оптимизация проточной части компрессора полного расхода для получения требуемой гидравлической характеристики не представляла особых трудностей, но компрессор половинного расхода

был в этом отношении сложным объектом из-за большой степени сжатия, сверхзвуковых скоростей газа в проточной части и большой потребляемой мощности.

Учитывая важность и сложность успешного решения задачи, ведомство выдавало задания на проектирование отдельных диффузионных машин параллельно двум организациям: ОКБ Горьковского машиностроительного завода (ГМЗ) и КБ при Кировском заводе в Ленинграде.

По завершении работ над опытным образцом каждого варианта машины специальная комиссия ведомства детально знакомилась с проектами, проводила испытания опытных образцов по утвержденной ведомством программе, затем сравнивала характеристики и выносила решение: какой вариант должен пойти в серийное производство после устранения в проекте возможных замечаний комиссии. Состязательный накал страстей разработчиков обоих КБ был чрезвычайно высок. Одним из показателей, который не раз способствовал нашему ОКБ одерживать победы в соревновании, была потребляемая мощность компрессором половинного расхода, которая у нас получалась существенно меньшей, чем у КБ Кировского завода. Специфичность этого компрессора, обусловленная сверхзвуковой скоростью рабочей среды в проточной части, выражалась в том, что его гидравлическая характеристика была строго вертикальной, то есть рабочая точка при изменении перемещалась по вертикали при постоянном объемном расходе. Поскольку потребляемая мощность при этих условиях определялась в компрессоре степенью сжатия, а максимальную степень сжатия необходимо было при проектировании выбирать с запасом, чтобы не допустить срыва работы каскада из-за отклонений условий работы по разным причинам, то этот запас объективно был вынужденным и обходился достаточно дорого из-за неизбежного увеличения потребляемой мощности.

Казалось бы, преодолеть это затруднение не так уж и сложно: достаточно начиная с номинального значения степени сжатия обеспечить горизонтальность характеристики в направлении допустимого уменьшения расхода. Вот этой задачей я и занялся практически в самом начале моей производственной деятельности.

В ОКБ разрабатывались два варианта конструкции компрессора половинного расхода: осевой сверхзвуковой компрессор по предложению научного руководителя М.Д. Миллионщикова (впоследствии академика) и центробежный сверхзвуковой компрессор — инициатива нашего ОКБ. В обоих вариантах при испытаниях опытных образцов полученные гидравлические характеристики имели устойчивую вертикальную часть и либо отсутствие горизонтальной части

(центробежный компрессор), либо неустойчивый горизонтальный участок (осевой компрессор).

Многократные повторные испытания компрессоров с выполнением частичных изменений конструкции проточной части не давали нужных результатов. Становилось ясным, что без детального понимания особенностей сверхзвуковых течений в проточной части компрессоров обоих вариантов поиск конструктивных решений задачи невозможен. Я очень переживал неудачи, тем более что считал себя ответственным за них, поскольку конструкторы строго следовали моим рекомендациям по геометрии проточных частей. Свои неудачи я был склонен относить за счет недостаточного знания механики сплошных сред, которая не входила в учебные программы физического факультета. Поэтому я погрузился в изучение фундаментального труда Кочина Н.Е. и Кочиной П.Я. «Механика сплошных сред». Однако с удивлением обнаружил, что сверхзвуковые течения там не рассматриваются. Ничего не нашел я по этой теме и в периодической печати, и в других книгах прикладного характера. И только позднее стало ясно почему. Дело в том, что именно в эти годы и в нашей стране, и за рубежом велись интенсивные исследования по созданию сверхзвуковой авиации. Поэтому все эти исследования были засекречены, и публикации по сверхзвуковой аэродинамике в открытой печати отсутствовали. Книга О.Б. Христиановича о сверхзвуковой аэродинамике вышла в 1948 г. с грифом «Совершенно секретно» и в ОКБМ появилась только в 50-х годах.

Сложившаяся ситуация относительно компрессора половинного расхода стала предметом обсуждения у главного конструктора И.И. Африкантова (который сменил на этом посту А.И. Савина, переведенного на работу в Москву вместе с директором и начальником ОКБ А.С. Еляном). На его прямой вопрос о сроках практического решения проблемы гидравлических характеристик по обоим вариантам я изложил свое мнение в следующей форме: решение проблемы гидравлических характеристик с устойчивым горизонтальным участком в назначенные сроки предъявления машины на испытания в обоих вариантах не просматривается. Поэтому оправдана ориентация только на центробежный вариант компрессора, поскольку вариант с вертикальной характеристикой мы уже испытали, требованиям она удовлетворяет, хотя экономию по мощности мы не получили. Но поиск и испытания по получению устойчивого горизонтального участка характеристики я считал необходимым продолжить.

После всестороннего обсуждения это предложение было принято, и одновременно решили работы по осевому компрессору прекратить. Главный конструктор поручил мне подготовить соответствующий

отчет о проведенных испытаниях по осевому компрессору за его подписью для обоснования решения о прекращении работ.

Такое решение было санкционировано ведомством, что вызвало большое неудовольствие научного руководителя М.Д. Миллионщикова. Однако Михаил Дмитриевич не только не перенес на меня лично свое неудовольствие, хотя и догадывался, кто истинный автор отчета, а, напротив, предложил мне на базе тех материалов, которые у меня накопились по центробежному варианту, подготовить под его научным руководством диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук, которую я и защитил в начале 1959 г.

Следует заметить, что в то время в ОКБ было не принято писать научно-технические статьи, оформлять авторские свидетельства на изобретения и тем более защищать диссертации. Такие попытки воспринимались в какой-то мере как дурной тон. Сейчас это кажется более чем странным, но это было так.

Поэтому без прямого давления со стороны М.Д. Миллионщикова я, по-видимому, еще долго не пришел бы к мысли о защите диссертации, хотя интересной и значимой в научно-техническом отношении информации у меня уже в первые годы работы в ОКБ накопилось более чем достаточно.

При дальнейших исследованиях в целях реализации устойчивого горизонтального участка гидравлической характеристики компрессора половинного расхода я, используя и теоретические соображения, и просто интуицию, предлагал конструкторам выполнить различные варианты облопачивания выходного направляющего аппарата компрессора с различной геометрией лопаток. Большинство из них были достаточно трудоемкими в изготовлении, а по результатам продувки оказывались бросовыми. И только понимание конструкторами и испытателями практической значимости этой работы в случае успеха заставляло их проявлять настойчивость и терпение в этом поиске.

В конце концов мы наткнулись на вариант проточной части компрессора, который обеспечивал достаточно протяженный и стабильный горизонтальный участок гидравлической характеристики, который позволил существенно уменьшить потребляемую мощность компрессора половинного расхода диффузионной машины. Эта экономия мощности явилась весьма выигрышным показателем в творческом соревновании по созданию машины. Во всех последующих разработках проектов диффузионных машин ОКБ скрупулезно следовало сохранению подобия найденной проточной части компрессора половинного расхода, что и обеспечивало получение горизонтального участка гидравлической характеристики.

При создании последующих диффузионных машин ведомство, убедившись, что оба КБ создают машины достаточно высокой надежности, приняло решение исключить дублирование разработок машин любой производительности и стало выдавать технические задания КБ Кировского завода на создание машин большой производительности, а ОКБ ГМЗ — на машины несколько меньшей производительности.

Поэтому потребляемая машинами КБ Кировского завода мощность была много больше, чем у машин ОКБ ГМЗ по двум причинам: из-за большей массовой производительности и из-за отсутствия горизонтального участка у гидравлической характеристики компрессора половинного расхода. Главный конструктор КБ Кировского завода Н.М.Синев обратился к И.И.Африкантову с просьбой передать им «ноу-хау» по реализации горизонтального участка гидравлической характеристики. В то время безвозмездный обмен такой информацией между предприятиями не был исключительным событием, если они не конкурировали в решении данной задачи. Поэтому Игорь Иванович выразил свое согласие и командировал меня в Ленинград в КБ Н.М. Синева с указанием передать все, что мы знаем по этой проблеме.

Я счел необходимым обратить внимание Игоря Ивановича, что наш положительный результат является сугубо эмпирическим, теоретически я его до сих пор не осмыслил достаточно полно. Испытав большое число вариантов геометрии лопаток выходного направляющего аппарата, мы наткнулись на необходимый результат. Оснований, что найденная нами геометрия лопаток даст тот же результат и для компрессора разработки КБ Кировского завода, нет, поскольку их геометрии входного направляющего аппарата и рабочего колеса существенно отличаются от наших.

Игорь Иванович, выслушав, подчеркнул, что мы должны быть искренними с ними, решая совместно очень важную отраслевую проблему. Поэтому он попросил меня передать им все, что мы знаем, понимаем и умеем. Затем он добавил: «Обрати их внимание и на свои сомнения». Я выполнил задание, передал всю имеющуюся информацию, ответил на вопросы конструкторов, в рамках нашего понимания проблемы проинформировал о своих сомнениях. Однако усилия конструкторов КБ Н.М. Синева успехом не завершились. Я не исключаю, что они могли подозревать меня в неполной передаче опыта ОКБ, в сокрытии чего-то существенного, но я был до конца откровенен с ними.

В 1953 г. Правительством СССР было принято решение о проектировании и строительстве первого в мире судна гражданского назначения с ядерной энергетической установкой (ЯЭУ) — атомного

ледокола с повышенной ледопроеходимостью, который впоследствии получил название «Ленин». Проектирование реакторной установки (РУ) ледокола было поручено нашему ОКБ.

В процессе выполнения проекта необходимо было проанализировать возможные схемы РУ, соответствующий им состав оборудования, требования к оборудованию. При этом должны были учитываться исходные требования технического задания на энергоустановку в целом, а также условия взаимодействия реакторной установки со смежными системами. Поэтому выбор более или менее оптимальной схемы реакторной установки для ОКБ был новой и сложной задачей, решение которой в то время было далеко не формальным заданием.

Не меньшие трудности представлял и выбор компоновки основного оборудования РУ и обеспечивающих систем, который, с одной стороны, диктовался ограничениями по габаритным и массовым характеристикам, а с другой стороны — требованиями доступности для профилактического обслуживания и выполнения ремонтных работ. Над всем этим довлело обязательное условие обеспечения ядерной и радиационной безопасности.

Мы начинали буквально с нуля, поскольку в мире отсутствовал какой-либо опыт проектирования ЯЭУ для надводного судна. Формулирование основных требований к установке и их обоснование было первоочередной задачей принципиальной важности, и ее решение, безусловно, было заслугой в первую очередь академика А.П. Александрова. Следует подчеркнуть, что эксплуатация ЯЭУ атомного ледокола «Ленин» подтвердила в целом обоснованность этих требований, и в дальнейшем они подвергались в основном ужесточению и корректировке с учетом результатов эксплуатации и последствий запроектных нарушений нормальных эксплуатационных режимов.

На меня были возложены задачи обоснования геометрии проточной части главного циркуляционного насоса (ГЦН), подготовка соответствующих исходных данных для конструкторов, участие в расчете действующих нагрузок на подшипники и в самих испытаниях ГЦН, а также в поузловых экспериментах, имеющих отношение к проточной части.

А случилось это так. Однажды И.И.Африкантов вызвал меня к себе и задал неожиданный для меня вопрос: «Федя (он меня всегда называл только по имени), как ты считаешь, можем ли мы для ледокола спроектировать герметичный насос?». Я в то время занимался только диффузионными машинами, точнее — теоретическим обоснованием конструкции компрессоров диффузионных машин, участвовал в подготовке заданий для проведения экспериментов, программ испытаний и обработке полученных результатов, этим исчерпывался

в то время мой производственный опыт. Я не был готов ответить на вопрос Игоря Ивановича и попросил разрешения подумать до конца дня. Он сказал: «Хорошо, подумай и завтра утром зайди ко мне».

Мои размышления свелись к следующему. С точки зрения механики сплошных сред проектирование компрессоров для газовой среды значительно сложнее, чем насосов для несжимаемой среды, какой является вода. Тем более, что в компрессоре половинного расхода в диффузионных машинах мы имеем дело со сверхзвуковым течением. Элементы проточной части в компрессорах и насосах по функциональному назначению совпадают. Проблема обеспечения герметичности в обоих случаях имеет место, хотя по давлению рабочей среды здесь очень большое различие. Я доложил эти соображения И.И.Африкантову и сказал, что создание герметичного насоса, с учетом имеющегося опыта по компрессорам, нашему КБ по силам. «Коли так, — среагировал Игорь Иванович, — готовь исходные данные для конструкторов».

Была разработана чертежно-конструкторская документация насоса и направлена в наше ведомство. Начальник управления А.Д. Зверев, курировавший разработку проекта ЯЭУ, направил документацию экспертам из ВНИИ «Гидромаш» на отзыв. Прошло какое-то время, и И.И. Африкантов вызвал меня и сообщил: «Мне только что звонил А.Д. Зверев и сказал, что эксперты в своем заключении написали, что насос по нашему проекту никакого напора давать не будет. Поезжай и разберись». И добавил: «Мы потеряли много времени, и опытный образец насоса уже в производстве».

При ознакомлении с экспертным заключением я был удивлен, что в нем отсутствует какое-либо аналитическое обоснование. Я решил, что, по-видимому, экспертов смутила некоторая необычность конструкции: гидростатические подшипники (инициатива Н.А. Боровкова), вместо традиционной улитки — двухзаходная, что обеспечивало некоторые компоновочные и конструктивные преимущества, хотя и не было нашим изобретением. Использование однозаходной улитки в нашем случае привело бы к увеличению габаритов насоса, что было неприемлемо по компоновочным соображениям.

Вернувшись из командировки, я доложил И.И. Африкантову свои соображения и заверил его, что напор насос обеспечит и, возможно, больший, чем надо, — тогда придется подрезать колесо. Испытания насоса подтвердили мое мнение. В дальнейшем на всех судовых ЯЭУ (начиная с РУ ОК-900) мы использовали насосы с выходным лопаточным аппаратом вместо улитки.

Неожиданности с насосом для атомного ледокола «Ленин» на этом не кончились. В соответствии с установленным порядком мы

готовили опытный насос для проведения комиссионных испытаний. В воскресный июньский день сдаточная команда во главе с первым заместителем главного конструктора Е.Н.Черномордиком проводила заключительные испытания по утвержденной программе. Все показатели соответствовали требованиям. Начальник стенда отключил напряжение, все вышли из лаборатории возбужденные и довольные. Евгений Наумович заявил: «Пойду звонить А.Д. Звереву, сообщу о завершении заводских испытаний и готовности к приемке комиссии». И тут я, неожиданно для самого себя, предложил: «Давайте еще раз пустим насос и тогда пойдем по домам». Е.Н.Черномордик на это заявил, что ничего нового этот пуск не даст, но если есть желание — включим. Начальник стенда включил пускатель, но насос не запустился. Внешняя проверка ясности в случившееся не внесла. Вышли на свежий воздух, стали перебирать возможные причины. Большинство из нас вначале грешило на двигатель, статорную обмотку, но по косвенным свидетельствам от этого пришлось отказаться.

Я стал думать, что, если причина не в двигателе, то в подшипниковых опорах. Тот факт, что насос заклинило при остановке двигателя, по-видимому, не был случайным совпадением. Насос располагался горизонтально, ротор охлаждался при работе горячей водой первого контура, а статор — холодной водой третьего контура. При остановке насоса перемешивание воды в роторной полости отсутствует, поэтому неизбежна температурная стратификация воды: внизу более холодная вода, чем сверху; ротор изгибается, и в подшипниковых опорах возможно расклинивание. Я высказал Е.Н.Черномордику свои соображения и предложил подать расход воды в роторную полость. Быстро провели изменения схемы на стенде, подали воду и через 10 минут нажали пускатель. Насос запустился без затруднений. В схеме проекта ЯЭУ ввели необходимые изменения и успешно сдали насос комиссии. В дальнейшем во всех проектах судовых ЯЭУ насос всегда компоновался вертикально, а позднее удалось найти более конструктивное решение и для горизонтального насоса, поскольку в проекте ВПБЭР-600 такое размещение насоса было предпочтительным.

Неожиданное продолжение история с горизонтальным размещением насоса имела в далекой Японии, куда я был приглашен в 1988 г. прочитать лекцию. Японцы, завершив ходовые испытания своего атомного судна «Муцу-І», усиленно работали над проектом «Муцу-ІІ». В этом проекте они заложили ряд прогрессивных решений: интегральный реактор, погружные приводы СУЗ и др. Они довольно подробно рассказали мне о проекте, хорошо иллюстрировали его плакатами, показали представительную модель реактора в масштабе 1:3. По окончании сообщений они просили меня высказать мнение

о проекте. Я сказал, что проект достаточно хорошо смотрится, но... работать не будет. В аудитории поднялся шум, меня попросили объяснить. Я обратил их внимание на горизонтальное расположение насоса и на последствия остановки насоса. Эффект был потрясающий. Когда я добавил, что с этим мы столкнулись при проектировании ЯЭУ для ледокола «Ленин», меня спросили, как мы вышли из этого тупика. Я сказал, что сейчас мы имеем несколько отработанных решений. В результате был заключен контракт, и мы передали японцам одно из наших проверенных решений.

Опыт тесного научного взаимодействия с научным руководителем позволил выявить узкие места организационного плана, преодоление которых в дальнейшем существенно повлияло на структуру и кадровый состав ОКБ. Полученный опыт привел руководство ОКБ и ведущих специалистов-конструкторов к пониманию того, что реакторная установка – это целостная система и что в процессе ее создания об этом нельзя забывать на все этапах разработки, и любые изменения в каком-либо оборудовании и составляющих системах могут существенно повлиять на рабочие характеристики и даже на работоспособность или безопасность РУ в целом. Поскольку притирка составных частей РУ продолжается на протяжении всего периода ее проектирования, а иногда и за его пределами, то весьма желательно, чтобы большая часть оборудования и обеспечивающих систем проектировалась в одной организации, в данном случае – в ОКБ.

Создание ЯЭУ для первого в мире атомного ледокола «Ленин» явилось важнейшим этапом в становлении ОКБМ, выборе научно-технического направления производственной деятельности нашего предприятия, определившим в значительной степени его структуру, развитие, требования к квалификации сотрудников.

О рабочей атмосфере в ОКБ

Я считал необходимым довольно подробно, с приведением даже некоторых деталей, описать свои первые шаги в производственных условиях ОКБ, поскольку они в конечном итоге привели к коренному изменению моих представлений о деятельности заводского ОКБ, ее значимости для страны, важности поручаемых ОКБ заданий. Эти изменения и определили в дальнейшем мою творческую судьбу.

Пока я проходил стадию оформления допуска для работы в ОКБ ГМЗ, которая заняла несколько месяцев, я размещался в одной из комнат Заводоуправления, где мне поручались некоторые задачи, не имевшие, как потом выяснилось, ничего общего с тематической направленностью работ ОКБ.

Задачи имели «артиллерийское» происхождение, поскольку касались баллистики, отдачи и т.д. Скорее всего, в отношении меня преследовалась практическая цель чем-то меня занять. Все эти задачи были далеки от учебных курсовых программ, которые я прослушал в университете на физическом факультете. Поэтому я счел полезным использовать предоставленное мне время для самообразования, ознакомился с заводской библиотекой, которая, неожиданно для меня, оказалась весьма неплохой, особенно по тематике, относящейся непосредственно или косвенно к артиллерии.

Ориентируясь на вопросы и задачи, с которыми ко мне обращались некоторые сотрудники из Заводоуправления, курирующие производство, я наметил для себя ознакомиться с механикой сплошных сред, сопротивлением материалов, поскольку в учебных программах физического факультета лекций по этим дисциплинам не предусматривалось.

Как потом оказалось, мой выбор был удачным, поскольку уже начало моей производственной деятельности в ОКБ потребовало ориентации именно в этих областях знания. Обстановка в Заводоуправлении, откровенно говоря, мне не нравилась. Всё еще носило отпечаток военного времени: и состояние рабочих помещений, и внешний вид сотрудников, их взаимоотношения и т. д. Это резко контрастировало с университетской обстановкой, с которой я уже свыкся за время учебы и в которую мысленно себя уже прописал на будущее. Поэтому можно без труда представить, как в эти первые месяцы пребывания на заводе я относился к перспективе связать с ним свою жизнь.

С таким настроением я появился и в коллективе ОКБ. Однако через две—три недели рабочего общения с сотрудниками я должен был признать, что коллективы ОКБ и Заводоуправления разнятся принципиально: деловая атмосфера в ОКБ ничего общего не имела с атмосферой, характерной для Заводоуправления. Позднее я объяснил для себя это тем, что для ОКБ определяющим является содержание действий, взаимоотношений, обращений, а не форма. Для аппарата Заводоуправления же, напротив, на первом плане — форма как организующее начало, упорядочивающее деятельность и аппарата управления, и, в конечном счете, коллектива завода в целом. Вся последующая моя производственная деятельность убедила меня в принципиальной важности понимания этого различия и его осознания, поскольку для творческой части любого коллектива излишняя формализация деятельности, взаимодействия, обращений, отчетности и т. д. затрудняет рождение новых идей, ограничивает проявление инициативы, не стимулирует поиск нового, нетрадиционного.

Сейчас мне представляется, что главный конструктор А.И. Савин и его первый заместитель Е.Н. Черномордик сознательно или

по интуиции способствовали созданию свободной, раскрепощенной атмосферы в коллективе, лишенной связывающих формальностей. Следует заметить, что коллектив был молодой и по времени организации ОКБ (1947 г.), и по возрасту сотрудников (большинство — менее 35—40 лет). Кадровый состав КБ формировался из сотрудников ГМЗ, расформированного КБ авиационного завода, из выпускников вузов — молодых специалистов. К моему приходу коллектив был уже достаточно спаянным с установившимся режимом работы. Установленный распорядок для большинства сотрудников был следующим: определено начало рабочего времени, перерыв на обед, обозначено и время окончания работы. Однако фактически рабочий день каждого сотрудника кончался тогда, когда допускало состояние порученной работы. Раньше 9 часов вечера конструкторы и расчетчики с работы практически не уходили. Это относилось и к нерабочим дням. Если необходимо, то без каких-либо приказов (по крайней мере, так казалось в тот период) необходимые исполнители выходили на работу и в нерабочие дни. Напряженный режим сказывался не только на распорядке дня, но и на отношении к порученной работе: ответственность, обязательность, качество решения вопросов.

Эта обстановка в чем-то напомнила мне ситуацию, когда мы, студенты, осенью 1941 г. были направлены на рытье противотанкового рва в районе ст. Кологривовка вблизи Саратова, где вместе с нами работали сельчане и даже школьники старших классов. Мне, бригадиру участка, не приходилось практически понукать, контролировать тружеников. Свой «урок» все выполняли качественно и с опережением. Так проявлялось коллективное сознание критичности сложившейся ситуации и, как следствие, целенаправленное стремление (в одних случаях осознанное, в других — подсознательное или «стадное») каждого выполнить порученную работу без проволочек, своевременно и качественно.

Конкретные работы, выполнявшиеся коллективом ОКБ, были новыми для каждого из участников, прототипов соответствующего оборудования либо не существовало, либо они нам были неизвестны и недоступны. Поэтому разработка базировалась на большом объеме экспериментальных исследований, испытании промежуточных опытных образцов оборудования, предшествовавших созданию головного образца и его всестороннему испытанию.

На этих экспериментальных работах, испытаниях промежуточных конструкций оборудования быстро росла квалификация инженеров-конструкторов, расчетчиков, исследователей, хотя формальное обобщение результатов, знаний, опыта на этой стадии отсутствовало. Со временем в коллективе выделилась плеяда ведущих

специалистов по разным аспектам создания новой техники для решения атомной проблемы, которые были отмечены высокими правительственными наградами и заслуженно пользовались большим авторитетом как в ОКБ, так и в смежных организациях, работавших в контакте с нами по атомной тематике.

Такая организация работ по созданию образцов новой техники в запланированные сроки требовала исключительно оперативной и согласованной работы всех звеньев создания оборудования. Выискивались и реализовывались все возможности сокращения времени, но не в ущерб качеству конструкции, экспериментальным исследованиям и испытанию образцов. В частности, шли на изготовление и доработку отдельных узлов оборудования по эскизам, на согласование эскизов с технологами, материаловедами, прочнистами и др. непосредственно при выпуске эскиза. Один из цехов завода занимался изготовлением только по документации ОКБ. Самое удивительное, что при такой организации работ мне не запомнилось ни одного грубого промаха, повлекшего серьезную задержку плановых испытаний или создания головного образца. Однако следует заметить, что несмотря на большой объем проводившихся экспериментальных исследований, в наших знаниях оставалось много белых пятен, которые не позволяли достаточно строго в рамках технической логики обосновать такие эксплуатационные характеристики создаваемой техники как срок службы, показатели надежности, вероятность выхода из строя ответственных узлов оборудования и другие.

Здесь выручал разумный консерватизм, которого последовательно придерживались при решении вопросов с недостаточной информацией по исходным данным. Немалую роль играла и интуиция ведущих специалистов.

Однако в ряде случаев консерватизм, как показала практика, был чрезмерным. Так, первый разработанный в ОКБ промышленный реактор, который начал эксплуатироваться в 1950 г., имел по проектной документации назначенный срок службы три года, а на самом деле был выведен из эксплуатации через 39 лет работы. Правда, в данном случае основной причиной такого расхождения назначенного и фактического сроков службы было отсутствие у проектантов какой-либо информации о влиянии нейтронного облучения на механические характеристики материала внутриреакторных конструкций и корпуса реактора.

Отмеченные выше особенности работы в ОКБ невольно фиксировались в моем сознании, поскольку я не переставал для себя сравнивать условия работы здесь с идеализированными мною условиями в университетской обстановке. Я видел, что работа и в ОКБ, и в университете имеет творческий характер. Однако, размышляя,

я обнаружил существенные различия. Если в университете поиск нового явления, процесса, результата был самоцелью, то в ОКБ поиск нового был только средством для решения целенаправленной задачи при создании нового оборудования, технических систем и др. И если найденное «новое» не способствует созданию системы, то оно, вообще говоря, не представляет интереса для конструктора.

Я, конечно, отдавал себе отчет, что результаты, получаемые в университетских лабораториях, в дальнейшем иногда имеют эпохальные последствия и для развития техники, и даже для мировоззрения. Но в те годы для меня лично имело громадное значение осознание того, что работа ОКБ — это интенсивный творческий труд, по своим результатам и значимости имеющий национальный характер. Поэтому я начал сомневаться, следует ли мне сетовать на судьбу, лишившую меня университетской карьеры, и продолжать усилия и попытки вернуться в университетскую среду?

Вскоре после того, когда меня стали одолевать такие мысли, у меня состоялся знаменательный разговор с И.И.Африкантовым. Обстоятельства были таковы. Где-то в конце 1954 г. позвонила его секретарь и попросила меня зайти к Главному конструктору. Я вошел в его кабинет. Игорь Иванович просматривал какие-то списки. Указав жестом на стул, он еще какое-то время продолжал просматривать списки, делая пометки. Затем отодвинул бумаги и пристально на меня посмотрел. Помолчав, неожиданно задал вопрос: «Федя, я могу положиться на твое слово?». Я несколько растерянно помолчал и спросил в свою очередь: «А разве, Игорь Иванович, я давал Вам повод сомневаться в моем слове? Мне думается, нет». Игорь Иванович согласился, что не давал, но все же хотел бы услышать от меня прямой ответ на прямой вопрос. Я сказал, что, конечно, можно полагаться.

Затем он заявил, что имеет возможность выделить мне двухкомнатную квартиру, но при условии, если я прекращу свои попытки уйти из ОКБ ради аспирантуры в университете. Должен сказать, что в это время я с женой и маленькой дочерью проживал в одной комнате. Меня это беспокоило не столько из-за тесноты, сколько из-за возможной опасности для здоровья дочурки. Дело в том, что туберкулез легких у меня продолжался. Я был на учете в больнице и постоянном амбулаторном лечении, хотя и не чувствовал себя сломленным, уставшим, несмотря на интенсивную работу. Я понял, что наступил момент, когда необходимо определиться однозначно со своим будущим.

Помолчав немного, попросил разрешения переговорить с супругой, поскольку мой любой ответ затрагивает всю семью, и поэтому ответ, по существу, должен быть «семейным», общим. На следующий день я сообщил Игорю Ивановичу, что выбор сделан, я принимаю его условия.

Реорганизация ОКБ

В соответствии с решением Правительства СССР, с 1 января 1964 г. ОКБ вышло из состава Горьковского машиностроительного завода и стало самостоятельным научно-производственным предприятием, получив статус Особого конструкторского бюро. Позднее, в 1967 г., предприятие получило свое нынешнее название — «Опытное конструкторское бюро машиностроения» (ОКБМ).

Директором и главным конструктором был назначен И.И. Африкантов. По каждому из направлений работ были определены заместители главного конструктора, первым заместителем директора—главного конструктора стал Е.Н. Черномордик. Меня И.И. Африкантов определил своим заместителем по научно-исследовательским работам, замкнув на меня существовавшие и будущие расчетные подразделения. Этому предшествовал целый ряд обсуждений и принятие судьбоносных для структуры ОКБМ решений. Свое согласие на замещение указанных должностей я связал с положительным решением следующих условий:

- сооружение достаточно мощного теплофизического стенда в целях определения критических нагрузок для тепловыделяющих элементов водо-водяных реакторов;
- организация группы для проведения расчетов нейтронно-физических характеристик водо-водяных реакторов и извлечения важной для конструкторов информации из отчетов, получаемых от научного руководства;
- организация группы для расчета эффективности биологической защиты от излучений.

В основе моих предложений лежал опыт, полученный при проектировании реакторной установки для атомного ледокола «Ленин» и промышленных уран-графитовых реакторов, когда нейтронно-физические расчеты и испытания проводились в Институте атомной энергии им. И.В. Курчатова, а конструкция реактора, биологической защиты, компоновка оборудования создавались в ОКБ.

При создании реакторной установки для атомного ледокола «Ленин» мы убедились, что надежных универсальных соотношений для определения критических нагрузок для тепловыделяющих элементов (ТВЭлов) активной зоны не существует. Поэтому их представительное определение требует проведения экспериментальных исследований в каждом конкретном случае с имитацией штатных условий и по мощности, и по гидродинамике, и по конструкции ТВЭлов и тепловыделяющих сборок (ТВС).

Оптимизация проектных решений требовала многократных проверок вносимых изменений и согласований. Учитывая пространственную разобщенность организаций, оперативное согласование решений было затруднительно, что приводило к многочисленным поездкам специалистов организаций в обоих направлениях.

Без специалистов по нейтронно-физическим расчетам мы не могли своевременно должным образом использовать и соответствующую информацию из отчетов, поступающих от ученых и специалистов научного руководства. Обращая внимание руководства на эти сложности, которые неизбежно будут снижать оперативность и качество работы ОКБМ, я считал необходимым подчеркнуть, что не исключаю в дальнейшем необходимости создания критического стенда в ОКБМ, хотя бы «холодного». Учитывая принципиальный характер этих предложений, И.И. Африкантов вынес их на обсуждение к начальнику 16 Главного управления Министерства среднего машиностроения Н.А. Николаеву, который активно поддерживал организацию ОКБМ и способствовал его становлению. Вопрос о сооружении теплофизического стенда он решил положительно и гарантировал необходимое финансирование, взяв с меня слово, что стенд будет не хуже того, что он только что видел в Голландии.

После моих пояснений он согласился, что и организация в ОКБМ группы нейтронно-физических расчетов в целях более оперативного проектирования активной зоны и биологической защиты также целесообразна. К вопросу о создании критического стенда он обещал вернуться после практической организации в ОКБМ группы нейтронно-физических расчетов.

Эти решения и были началом создания в структуре ОКБМ специализированных расчетных и конструкторских подразделений, многофункционального экспериментального и испытательного комплекса, который в ОКБМ стал важнейшим звеном всего цикла проектирования, экспериментального обоснования принимаемых проектных решений, а также базой для испытаний опытных и головных образцов создаваемого оборудования.

К настоящему времени в состав комплекса экспериментальных и испытательных лабораторий ОКБМ входят:

- лаборатория нейтронно-физических исследований, которая располагает стендами для «холодных» (комнатная температура) и «горячих» (рабочая «штатная» температура) нейтронно-физических исследований;
- лаборатория гидродинамических исследований оборудования;
- лаборатория теплофизических исследований каналов реактора, парогенераторов, теплообменников;

- лаборатория для прочностных и вибрационных исследований;
- лаборатория акустических исследований;
- лаборатория для коррозионных исследований конструкционных материалов;
- лаборатории для испытаний опытных и головных образцов насосов, арматуры, приводов системы управления и защиты (СУЗ), измерительных средств и другого ответственного оборудования разрабатываемых РУ.

В состав комплекса входит также мощный стенд для отработки теплообменного оборудования высокотемпературных реакторов с гелиевым теплоносителем с выходной температурой до 950 °С. Проектная мощность стенда на рабочем участке до 15 МВт. Появление в структуре ОКБМ специализированных подразделений по отдельным видам оборудования диктовалось практикой создания нового оборудования для атомной энергетики. Уже при проектировании оборудования реакторной установки ледокола «Ленин» мы столкнулись с тем, что даже узкоспециализированные организации, получив задание на создание оборудования их компетенции для реакторной установки, затруднялись спроектировать и отработать должным образом оборудование с характеристиками, соответствующими требованиям задания, включая надежность и обоснованность.

Последующая производственная деятельность ОКБМ и его развитие подтвердили эффективность такой структуры и организации конструкторских работ с участием специализированных подразделений. Именно за счет такой организации достаточно быстро росла квалификация специалистов, что благотворно влияло на качество конструкций разрабатываемого ОКБМ оборудования.

Росту знаний и квалификации специалистов весьма способствовало увеличение объема экспериментальных исследований практически по всем вопросам, относящимся к проектируемым в ОКБМ оборудованию и системам, поскольку задача любого исследования сама по себе требовала углубленных знаний в соответствующей области для грамотной постановки и соблюдения определенных условий при реализации эксперимента. Одним из важнейших условий является обеспечение представительности результатов проводимых экспериментов, которое в первую очередь сводилось к достаточно корректной имитации штатных условий работы элементов конструкции и протекания определяющих процессов. Обоснование представительности исследований во многих случаях являлось непростой задачей и требовало специальных знаний.

Не менее поучительной является и работа над программами конкретных исследований, поскольку и в этом случае представительность

результатов, их полнота являлись главной целью для принятия соответствующих конструктивных решений.

Рост знаний и опыта специалистов ОКБМ позволил в конечном итоге решить задачу, сформулированную И.И.Африкантовым еще в первые годы существования ОКБМ, а именно: сосредоточить в ОКБМ разработку конструкций всего основного оборудования корабельных и судовых реакторных установок, их представительного теоретического и экспериментального обоснования. ОКБМ в настоящее время разрабатывает конструкцию реактора, включая активную зону, приводы и органы управления и защиты, биологическую защиту, главные циркуляционные насосы, парогенераторы, арматуру первого контура, паровую арматуру, теплообменники и др. Весь этот объем оборудования, за исключением парогенератора, в ОКБМ разрабатывался и для РУ с быстрыми реакторами и натриевым теплоносителем, а также для высокотемпературных установок с гелиевым теплоносителем.

Высокая квалификация конструкторов ОКБМ позволила разрабатывать виды оборудования, не имевшие прототипов, например, оригинальный по конструкции и теплофизическим характеристикам модульный парогенератор, герметичный асинхронный турбогенератор, герметичную натриевую и гелиевую арматуру, перегрузочные комплексы и др. Отмечая высокую эффективность сложившейся в ОКБМ организации работ над проектами, подтвержденную многолетней практикой, я не могу не напомнить, что она родилась в коллективе с развитым чувством корпоративности, когда между подразделениями и отдельными исполнителями не наблюдалось противоречий, антагонизма на производственной почве. У меня нет уверенности, что структура и схема организации работ в ОКБМ окажется столь же эффективной при отсутствии или утрате в коллективе духа корпоративности, чему весьма способствует навязываемая «перестройкой» криминальная рыночная экономика.

Наличие в составе ОКБМ таких специализированных подразделений как отдел нейтронно-физических исследований, отдел теплофизических исследований активной зоны и оборудования реакторной установки, отделов определения гидродинамических характеристик оборудования, динамических исследований реакторной установки с целью определения переходных режимов, устойчивости, аварийных режимов, вопросов управления и безопасности, исследований прочности и ресурсной надежности позволяло обеспечить с начальной стадии системное проектирование реакторной установки, которая рассматривается как целостный «организм».

Это положительно сказалось и на эффективности взаимодействия с научным руководством, поскольку обсуждение всех вопросов

при согласовании проектных решений стало более конкретным и продуктивным.

В последние годы своей жизни А.П. Александров в узком кругу неоднократно повторял, что ОКБМ не нужно научное руководство. Принципиальный разговор по этому вопросу имел место на тройственной встрече по инициативе академика В.А. Легасова, на которой Анатолий Петрович сказал, что он уже не раз говорил мне о своей позиции, но я не согласился, имея свое мнение. Валерий Алексеевич попросил меня пояснить мою позицию. Я сказал, что функции научного руководства по отношению к ОКБМ со временем существенно меняются по содержанию. Если при проектировании первой реакторной установки для ледокола «Ленин» научный руководитель давал нам исходные данные по активной зоне, по биологической защите, к которым мы относились как к требованию, то при проектировании установки третьего поколения мы обсуждали на равных характеристики, которые получили по результатам расчетов наших физиков, теплофизиков, прочнистов. Это обсуждение в порядке согласования было весьма содержательным. Это не исключало, что специалисты научного руководства брали какие-то вопросы на заметку для дополнительной углубленной проработки. Но главное, что научное руководство имеет теперь большую возможность смотреть на перспективу и искать новые идеи, учитывая, что в текущих задачах можно полагаться на ОКБМ. Поэтому я за сохранение института Научного руководства, а содержание руководства может и наверняка будет меняться со временем под воздействием изменяющихся условий. На этом обсуждение и завершилось.

Положительное влияние возросшей обоснованности принимаемых и предлагаемых ОКБМ конструктивных решений сказывалось и на технических заданиях, выдаваемых контрагентам по отдельным видам оборудования, системам управления и защиты, а также при обсуждениях всех вопросов с заказчиком реакторной установки и генеральным проектантом.

Многолетняя практика сервисного обслуживания в процессе эксплуатации реакторных установок ОКБМ также подтвердила большую значимость детального знания особенностей оборудования и систем в обеспечении высокого качества выполняемых работ.

При всей обоснованности специализированных подразделений в структуре ОКБМ следует, однако, обратить внимание и на одно негативное последствие, а именно: практически неизбежную утрату специализированными подразделениями в какой-то степени чувства целого, то есть восприятия создаваемой установки в целом, составной частью которой и являются отдельные объекты специализации.

Из-за этого оптимизация создаваемой установки может заметно усложниться, поскольку оптимизация отдельного оборудования далеко не всегда совпадает с оптимизацией установки в целом. Преодоление такого недостатка узкой специализации может достигаться только за счет своевременного вмешательства главного конструктора и его головного подразделения по проекту.

К сожалению, начавшаяся «перестройка» не только затормозила кадровое развитие ОКБМ, совершенствование технического оснащения всех видов деятельности предприятия (автоматизированное проектирование – САПР, совершенствование экспериментальной базы, компьютеризация управления производством, предприятием в целом и др.), но и привела к потере более половины кадрового состава, включая ведущих специалистов, утрате большей части экспериментальных установок, измерительных систем и др. Однако радует, что при появлении первых признаков стабилизации в стране в ОКБМ наметился возврат к выработанной ранее организационно-технической политике развития ОКБМ.

Об организации проектных работ над «заделом»

Оглядываясь назад, я мысленно просматриваю те изменения, которые приходилось вводить в организацию проектных работ, пытаюсь проанализировать поводы, причины этих изменений, преследуемые цели, их обоснованность. Сейчас мне представляется, что введившиеся изменения в основном были обусловлены стремлением примирить, найти консенсус между двумя действующими началами, неизбежно определяющими весь процесс создания любой новой технической системы, в том числе и ЯЭУ, а именно: с одной стороны, достаточно жесткое сквозное управление, опирающееся на детальный контроль выполнения конкретных работ, завершения плановых этапов и т. д.; с другой стороны, создание для творческих подразделений условий, способствующих проявлению инициатив, поиску новых, более совершенных или оптимальных проектных решений. Эти начала находятся в некотором противоречии, и поэтому поиск оптимальной организации работ, которая бы в максимальной степени способствовала поиску новых проектных и конструктивных решений и отвечала всем требованиям планового и бухгалтерского формализма, является весьма непростой задачей.

Сейчас я склонен думать, что общего решения этой задачи, зависящей, как правило, от многих факторов, не существует. Оно зависит и от особенностей создаваемой системы, и от сложившейся структуры и традиций организации-проектанта, и от особенностей предприятий,

участвующих в отработке конструкций на стадии опытно-конструкторских работ, и в изготовлении головного образца. Личностный фактор также весьма значим. Удачное решение проблемы и его реализация даже для опытного руководителя является в какой-то мере результатом интуиции и достигается практически методом последовательных приближений.

В творческих организациях типа ОКБМ необходимым условием непрерывного роста квалификации специалистов и потребительских качеств создаваемой продукции является эффективная работа по созданию «задела», то есть поиск и формирование новых технических идей, реализация которых позволит совершить очередной скачок в потребительских качествах изделий, недостижимых в принципе на освоенных решениях. Это в корне отличается от эволюционного совершенствования, который имеет место в любой области техники и прерывается только с появлением качественно новых проектных решений, с которыми традиционные решения неконкурентоспособны.

Необходимо иметь в виду, что противопоставление эволюционного и революционного направлений развития техники, вообще говоря, неправомерно, поскольку фактически эти направления — две стороны единого процесса развития техники. История техники любой отрасли подтверждает действенность обоих указанных направлений и логическую необходимость каждого из них. Усилия по эволюционному совершенствованию оправданы до тех пор, пока не исчерпаны потенциальные возможности совершенствования установленных проектных и конструктивных решений, которые в принципе всегда ограничены, в то время как рост требований к потребительским качествам любой технической системы практически неограничен.

Поэтому для любой творческой организации работа над «заделом» должна быть не эпизодической, а постоянной плановой работой. В случае если организация подошла к исчерпанию возможностей эволюционного совершенствования, а задел по новым решениям отсутствует, то организация по этому направлению фактически переходит на ремесленнический путь, на путь повторений того, что когда-то, возможно, и было большой удачей, но к рассматриваемому периоду рынок потребителей уже удовлетворить не может.

К настоящему времени структура ОКБМ включает: головные подразделения, которые отвечают за выполнение в проектах требований технических заданий по созданию ЯЭУ для различных направлений энергетики; специализированные подразделения по видам оборудования, теоретические подразделения, обосновывающие характеристики оборудования, динамические характеристики и безопасность ЯЭУ

в целом. Все перечисленные подразделения работают в тесном взаимодействии со специализированными экспериментальными лабораториями. Такая структура позволяет выявить узкие места проектируемой установки в целом, недостатки отдельного оборудования и наметить пути и средства их преодоления, а также определить направления перспективных поисковых работ.

Однако зачастую руководители подразделений, перегруженные текущими заботами, вопросам «задела» на будущее уделяют внимание и время по остаточному принципу, тем самым переводят поиск новых идей в разряд второстепенных по значимости работ, а это сразу сказывается на исполнителях, на их инициативности и интенсивности поиска нестандартных решений, на их желаниях работать по «заделу». Поэтому очень важно осознание руководителями творческих подразделений, что без «задела» новых идей, решений, творческая организация существовать не может.

Кроме того, необходимо понимание того, что задельными работами может заниматься далеко не каждый конструктор, значительная часть конструкторов не может устойчиво работать, если не надеется увидеть в недалеком будущем своих решений в металле. Творческие личности наоборот, как правило, тяготеют текущей работой по совершенствованию изделий за счет поддетальной оптимизации. Но работа над заделом предполагает хорошее знание того, что уже сделано по интересующему направлению, поскольку без этого невозможно выявить узкие места в существующей конструкции, которые и не позволяют обеспечить требуемый рост потребительских качеств. А если критические места известны, то задача поиска новых идей, соответствующая известной поговорке «найти то, не знаю что», уже приобретает некоторую определенность.

Вначале казалось, что оптимальным организационным решением является создание специального подразделения для поиска перспективных решений в составе ведущих специалистов по отдельным видам оборудования и систем, имеющих достаточно большой опыт работы и уже зарекомендовавших себя с профессиональной стороны.

В ОКБМ имела место попытка обеспечить более интенсивную и результативную работу по заделу для корабельных ЯЭУ путем создания такого специального подразделения. Однако по результатам работы она оказалась неудачной, ожидания не оправдались. Размышляя над этим, пришли к заключению, что такой подход подобен искусственной пересадке растений из разных мест в новое место с другой почвой и атмосферой, поэтому растения и не расцвели пышным цветом.

По-видимому, при поиске оптимальной организации работы по созданию перспективного задела для нашей области техники следует

руководствоваться одним универсальным принципом, что творческие личности, работающие над заданием, должны быть поставлены в условия, которые в максимальной степени способствуют проявлению их инициативы, дают им свободу выбора направления поиска, накладывают минимальные ограничения по формальным признакам. При этом, конечно, конкретная форма организации работы складывается с учетом особенностей конкретных личностей, установившихся традиций и материальных возможностей предприятия. Немаловажную роль играет и то, как относится основная часть коллектива предприятия к особым условиям, создаваемым для небольшой части специалистов. Очевидно, что в глазах всего коллектива оправданием могут быть только конкретные результаты работы избранной группы.

Обсуждая проблему задельных работ в условиях ОКБМ, следует определиться и с ее тематической направленностью. Мне представляется, что нет достаточных оснований считать, что ОКБМ и впредь будет в полной мере обеспечено заказами по атомной тематике в соответствии с его научно-техническими и производственными возможностями. Фактическое состояние страны, отсутствие долговременной программы экономического и, в частности, энергетического развития страны, базирующейся на реальных источниках финансирования, отнюдь не вызывают оптимизма в этом отношении*. Поэтому в целях смягчения возможных последствий такой неопределенности необходимо в перечне задельных работ иметь и поиск перспективных тематических направлений, включая разработку реальных проектов, на случай недоиспользования потенциала ОКБМ по атомной тематике.

Выбор таких перспективных направлений должен опираться на грамотные исследования специалистов, имеющие целью определение видов оборудования или технических систем, в которых внутренний и международный рынки уже испытывают недостаток или прогнозируется потребность по тем или иным экономическим причинам.

ОКБМ в тяжелые годы перестройки могло поверить в свои возможности в сжатые сроки создавать и поставлять потребителям конкурентоспособное оборудование для различных отраслей промышленности (нефтеперерабатывающие предприятия, химические производства, молокоперерабатывающие, коммунальные организации и др.).

* В 2003 г. принята «Энергетическая стратегия России на период до 2020 года» (Распоряжение Правительства РФ от 28.08.2003 № 1234-р).

Методология работы по созданию реакторных установок

На начальном этапе деятельности ОКБ в составе ГМЗ работы по созданию оборудования по различным тематическим направлениям (диффузионные машины, промышленные реакторы) не отвечали требованиям методологической общности. Это было обусловлено, в основном, следующими причинами:

- по режимным соображениям не допускалось совместное обсуждение технических вопросов специалистами разных направлений;
- организация работ в значительной степени определялась опытом и особенностями руководителей тем;
- отсутствовал специфический опыт создания оборудования по каждому из тематических направлений.

Предельно жесткие установленные сроки разработки проектов исключали возможность поиска оптимальной схемы организации работ. Поэтому руководитель темы исходил из личных представлений об оптимальности организации работы над проектом и ее конечной результативности.

В этих условиях только у руководителей КБ верхнего уровня скапливалась информация, необходимая для обсуждения методологических вопросов и оптимальности организации работ. Поэтому на начальном этапе именно руководство ОКБ выступало инициатором рекомендаций и решений, направленных на совершенствование методологических основ при создании новой техники независимо от тематического направления.

Постепенно в ОКБМ сложилась базовая методология разработки проектов и их реализации, следование которой обеспечивало приемлемые результаты. Это подтверждает весь опыт многолетней работы по проектированию и авторскому сопровождению эксплуатации всех объектов разработки ОКБМ.

Основу этой методологии составляют следующие положения:

- тщательный анализ технического задания с целью определить новые требования по сравнению с ранее разрабатываемыми аналогичными проектами;
- поиск возможных прототипов существующих проектов систем, приближающихся по характеристикам к требованиям задания;
- концептуальная оценка возможности удовлетворения требований задания за счет использования проверенных, известных, хорошо зарекомендовавших себя технических решений;
- выявление в ряду планируемых проектных решений критических, определяющих выполнение совокупности требований задания;

- выбор вариантов для следующей стадии разработки проекта;
- анализ разработанных вариантов проекта с целью определить вариант, наиболее полно удовлетворяющий требованиям технического задания, наличие и особенности критических проектных решений, допустимость их использования в проекте;
- выбор варианта (или вариантов) для завершающей стадии разработки проекта;
- разработка и обоснование программы экспериментальных работ, испытаний конструктивных элементов, моделей и натуральных образцов оборудования;
- обоснование ресурсной надежности и сроков службы отдельных видов оборудования и технической системы в целом;
- обоснование безопасности разработанной технической системы в соответствии с действующими нормативами.

Указанные положения методологии дополняются рядом соображений, отражающих сложившуюся и оправдавшую себя инженерную практику. Следует учитывать, что при разработке проекта любой более или менее сложной технической системы конструктор не располагает достаточно полной исходной информацией. Более того, во многих случаях он не может рассчитывать и на восполнение недостающей информации в необходимом объеме за счет проведения специальных экспериментальных работ по техническим или экономическим причинам.

Поэтому разработанный проект должен быть выполнен с разумным консерватизмом, что фактически предполагает использование неформализуемого опыта и даже интуиции конструктора.

Проведение экспериментальных исследований, испытание моделей, опытных образцов являются неотъемлемой частью конструирования, поиска оптимальных решений, уточнения или определения действующих нагрузок различной физической природы на элементы конструкций. Вначале нам представлялось, что наиболее целесообразным вариантом решения этой задачи является изготовление натурального образца оборудования или его представительной модели, оснащенной всеми необходимыми детекторами для фиксации интересующих (характерных для процесса) параметров, определяющих воздействия, которые испытывают конструктивные элементы в ходе рабочего процесса.

Однако практика достаточно быстро нас убедила в ошибочности такого выбора. Изготовление натурального образца – достаточно дорогое, затратное и трудоемкое мероприятие, требующее в большинстве случаев относительно длительных сроков. Оснащение натурального образца в необходимом объеме датчиками (детекторами) – весьма

непростая задача и для конструктора, и для изготовителя. Это может существенно усложнить и удорожить экспериментальный образец и в целом исследования, а главное, в большинстве случаев не позволяет обеспечить желаемой представительности и полноты исследований.

Поэтому в дальнейшем пришли к следующей схеме организации экспериментальных исследований. В каждом виде оборудования, входящего в состав проектируемой системы, в процессе проектирования определяется те конструктивные элементы, которые в той или иной мере определяют (и лимитируют) его функциональное качество или ресурсную надежность. И если теоретические расчеты не позволяют в каждом конкретном случае с достаточной уверенностью обосновать его качество, надежность или обосновать необходимые конструктивные изменения, то ставится задача проведения специальных экспериментальных исследований. При этом важнейшим вопросом является обоснование представительности экспериментальных исследований, которая сводится к достаточно полной имитации условий протекания процесса и воздействий, испытываемых данным элементом в штатных условиях. Эта имитация и определяет все требования к стенду, который должен создаваться для проведения целевых экспериментальных исследований.

При таких (поузловых) исследованиях требования к системам измерений и их реализации заметно упрощаются. Имея результаты поузловой отработки конструкции при испытаниях опытного или головного образца достаточно подтверждения полной и качественной отработанности конструкции и соответствия его характеристик требованиям технического задания. В соответствии с этой задачей и формируется программа испытаний опытного образца, который уже не перегружается датчиками для исследования локальных особенностей протекания процесса.

Одной из важнейших задач, подлежащих решению в процессе конструирования, является обоснование ресурсной надежности и безотказности оборудования и системы в целом.

Сложность решения этой задачи усугубляется рядом особенностей, характерных для ЯЭУ: разнообразие воздействующих эксплуатационных факторов, недостаточная статистическая представительность имеющегося опыта и др. С другой стороны, технические и экономические преимущества атомной энергетики в полной мере могут проявиться при сроках службы энергоустановок, значительно превышающих сроки службы традиционных энергоисточников. Это обусловлено тем, что капитальные затраты на проектирование и строительство атомных энергоисточников заметно

превышают аналогичные затраты для традиционных энергоисточников, а эксплуатационные затраты существенно ниже. Следует заметить, что при реализации обсуждаемых в настоящее время законов о возмещении ущерба от воздействия на окружающую среду в процессе эксплуатации любых энергоисточников атомная энергетика будет иметь неоспоримые преимущества с учетом разработанных рекомендаций МАГАТЭ по вопросам безопасности вновь сооружаемых АЭС, которые имеют, по существу, обязательный характер и вошли как требования к проектам в национальные законодательства.

Атомные энергоисточники, удовлетворяющие этим требованиям, исключают недопустимые воздействия на окружающую среду не только при нормальных режимах эксплуатации, но и при любых практически возможных аварийных ситуациях.

Известная неопределенность ресурсных показателей, выявляемая в процессе проектирования и компенсируемая консервативностью проектных подходов, обусловила разработку специальных методик по обеспечению продления ресурса при проектировании. С этой целью предусматривается проверка фактического состояния критических узлов по специальным программам в процессе эксплуатации. По результатам проверки определяются возможности продления ресурса ЯЭУ за пределами назначенного срока, которые могут быть значительными. Так, ресурс ЯЭУ ледокола «Арктика» был увеличен со 100 тыс. часов до 175 тыс. часов.

Практика показала, что оптимальная организационная форма решения этой задачи достигается в том случае, когда ОКБМ берет на себя функции сервисного обслуживания установки. Для ОКБМ это было возможно, поскольку предприятие располагало специалистами и производственными возможностями. Сервисное обслуживание разработанных ОКБМ реакторных систем в определенной степени соответствовало интересам самого предприятия, поскольку при этом оно получало непосредственно из первых рук детальную и надежную информацию о состоянии оборудования, систем и их функционировании, о возможных отклонениях условий эксплуатации от проектных, причинах нарушений работоспособности оборудования и др.

Это позволяло оперативно анализировать каждый конкретный случай, вырабатывать рекомендации по восстановлению работоспособности аварийного оборудования, а также делать необходимые выводы при разработке новых проектов.

О кадровой политике

Кто пережил этапы рождения новой организации, ее становления, развития, тот понимает истинный смысл широко известного в свое время сталинского лозунга: «Кадры решают все!». В этой фразе я вижу глубокий смысл, отражающий многовековой опыт развития человеческой цивилизации.

Это изречение фактически предписывает определиться с ближайшими конкретными задачами и принципиально — с последующими. Под эти задачи и должны подбираться и выращиваться кадры.

При формировании нового предприятия ведущие кадры должны отвечать требованиям инициативности, напористости, способности реализовать при неизбежных трудностях выработанную стратегию рождения, создания нового предприятия и начального этапа его функционирования. На последующих этапах могут потребоваться кадры другого типа с дополнительными новыми знаниями, опытом, умением. Из практики известно, что нередко люди, положительно заявившие о себе на самом первом этапе, оказывались несостоятельными на последующих этапах деятельности предприятия.

Рассчитывать на готовые кадры в большинстве случаев не приходится. Реально ведущие кадры растут вместе с решаемыми задачами. Поэтому очень важно для лидера, формирующего команду, уметь рассмотреть потенциальные возможности кандидатов, чтобы не допустить грубых ошибок, поскольку такие ошибки обычно переживаются болезненно и затрагивают многих людей в коллективе.

И.И.Африкантову удалось сформировать команду верхнего уровня, которая, не изменяясь существенно по составу, сумела должным образом обеспечить все этапы рождения, становления и развития ОКБМ в соответствии с выработанной на раннем этапе стратегией, успешно выполнить задания по созданию новой техники, а затем и пережить распад страны и выжить в условиях губительной «перестройки», сводившейся лишь к уничтожению и расхищению всего и вся без заботы о сохранении чего-либо и созидания нового.

С начала самостоятельного существования ОКБМ особенно не рассчитывало на формирование необходимой кадровой структуры за счет привлечения готовых кадров. Расчет был в основном на внутренние резервы и на молодых, еще не сложившихся специалистов, поскольку атомная энергетика сама была «молодой», зарождавшейся на наших глазах, новой отраслью техники. Поэтому перепрофилирование специалиста, опыт которого сформировался на создании другой техники, могло оказаться более трудным и менее эффективным, чем доучивание молодых специалистов — выпускников вузов.

По инициативе И.И.Африкантова в 1967 г. при Горьковском политехническом институте был организован новый факультет — физико-технический. Большая часть общих учебных программ этого факультета была разработана с участием специалистов ОКБМ, а разработка программ по профилирующим дисциплинам ОКБМ взяло на себя в полном объеме. Оснащение учебных лабораторий и подготовка методик проведения лабораторных работ также были выполнены специалистами ОКБМ. Профилирующие (специальные) кафедры в первые годы по совместительству возглавляли ведущие специалисты ОКБМ. В дальнейшем некоторые из них полностью перешли на учебную работу на этом факультете.

Нельзя переоценить значимость для развития ОКБМ физико-технического факультета. Возможность отбора лучших студентов для пополнения ОКБМ начиная с четвертого курса, прохождение ими учебной производственной практики в подразделениях нашего предприятия позволили подключать выпускников после окончания института сразу к плановым работам, исключив период адаптации. В настоящее время сделан следующий важный шаг в подготовке специалистов для ОКБМ: непосредственно на предприятии открыты филиалы двух профилирующих кафедр физико-технического факультета НГТУ.

К настоящему времени костяк специалистов ОКБМ составляют выпускники этого факультета. Значительная часть специалистов теоретических и экспериментальных подразделений являются выпускниками радиофизического, механико-математического и физического факультетов Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского.

Анализируя опыт «доучивания» выпускников вузов по части специфических вопросов атомной техники, я начинаю сомневаться в целесообразности узкой специализации выпускников в вузах. Мне представляется, что в настоящее время, когда стремительно растет номенклатура и объем специальных знаний, становится оправданной ориентация вузов на более широкий круг знаний выпускников, даже в какой-то мере в ущерб их глубине, поскольку на месте будущей производственной и научной работы их «доучивание» в какой-то специальной области неизбежно и достигается довольно быстро. Опыт ОКБМ с выпускниками Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского и из технических вузов подтверждает это заключение.

О значимости социального фактора

Ранее я обращал внимание на значимость так называемой «корпоративности» для успешной деятельности творческого коллектива. Под этим термином я разумею такое преобладающее состояние (настрой) коллектива, когда каждый его член ощущает свою органическую, неразрывную связь с коллективом, не мыслит себя вне его и в своих действиях руководствуется положением, что не только его занятость, но и его материальное благополучие и его семьи во всех отношениях определяются эффективностью производственной деятельности коллектива предприятия в целом. Легко видеть, что такое понимание корпоративности созвучно с принципом «один за всех и все за одного». Такое состояние коллектива не может быть достигнуто за счет каких-либо приказов, оно возникает постепенно, неосознанно при условии целенаправленных положительных изменений в условиях производственной деятельности и жизни сотрудников предприятия. Следует заметить, что наибольшую значимость для развития корпоративности имеет даже не абсолютная величина изменений, а установившаяся тенденция положительных изменений, преобразований в желательном для коллектива направлении.

Поэтому на всем протяжении развития ОКБМ одной из важнейших задач, требовавших постоянного внимания руководства, наряду с совершенствованием производства и организации труда, была социальная сфера, которая включала и оплату труда, и обеспечение жильем, детсадами, пионерлагерями и местами отдыха сотрудников, членов их семей и организацию здравоохранения в коллективе. Острота этих вопросов была чрезвычайной. Страна только что закончила разрушительную войну, а на пороге уже во весь рост поднялась «холодная» война. Нельзя было допустить перерастания ее в «горячую» войну, что опять требовало от страны мобилизации усилий и средств. Однако и в этих условиях находились пути и способы для решения социальных вопросов.

Перечисленные выше задачи включались в ежегодные планы развития ОКБМ, в коллективный договор, принимавшийся на ежегодной профсоюзной конференции, в рабочие планы партийного и профсоюзного комитетов предприятия.

На профсоюзных конференциях директор ОКБМ не только докладывал о выполнении производственных планов предприятия, но и отчитывался по каждому пункту принятых обязательств в социальной сфере. Поэтому директор должен был тщательно оценивать реальные возможности предприятия при принятии каждого пункта обязательств и ни в коей мере не опускаться до популизма пустых

обещаний. Поэтому принятию обязательств предшествовала большая работа руководства ОКБМ в Министерстве, поскольку оно определяло объем средств на социальные нужды каждого предприятия. Эта работа требовала инициативы, настойчивости, исключительной активности. Без этого минимально необходимой финансовой обеспеченности социальных нужд предприятия добиться было невозможно. Это, конечно, объяснялось тем, что Министерство само имело ограничения по объему средств, выделяемых на социальную сферу.

Следует признать, что предпринимаемые усилия приносили свои плоды. Уровень заработной платы в ОКБМ до «перестройки» был одним из самых высоких среди предприятий г. Горького. Ежегодно имелась возможность улучшать в порядке очередности жилищные условия значительному числу семей (от 20 до 200).

Для молодых специалистов были построены два жилых дома с одноквартирными квартирами. Были также построены три образцовых детских сада, пионерский лагерь, медико-санитарная часть в составе поликлиники и больницы, летняя база отдыха на берегу Горьковского моря, лыжная база, спортивный комплекс с несколькими залами, душами и сауной. Поскольку в г. Горьком до «перестройки» наблюдался хронический недостаток строительных мощностей и рабочих строительных специальностей, освоение выделяемых средств на строительство социальных объектов требовало непосредственного участия сотрудников ОКБМ в строительстве. В частности, строительство базы отдыха, лыжной базы, спортивного комплекса в полном объеме выполнялось силами ОКБМ. В остальных перечисленных строительных объектах сотрудники нашего предприятия также принимали непосредственное участие. Столь значительное отвлечение сотрудников от непосредственного выполнения производственных работ, несомненно, должно было сказаться на выполнении рабочих планов. Чтобы не допускать этого, приходилось идти на увеличение напряженности планов, интенсивности труда (там, где это было допустимо), на ужесточение контроля за использованием рабочего времени и т. д.

Однако объективность обязывает отметить и положительные последствия отвлечения сотрудников от основной деятельности. Они выражались в том, что в коллективе постоянно формировалось и укреплялось чувство ОКБМовского патриотизма, корпоративности, поскольку сотрудники и члены их семей непосредственно ощущали непрерывное улучшение и рост социальной сферы, достигнутое с их непосредственным участием.

Я склонен считать, что истинная сплоченность коллектива, дух корпоративности воспитывается и определяется не только, а возможно, и не столько общностью тематики работ, производственной

деятельности, но и общностью возможностей и прав на такие социальные услуги как жилье, медицинское обслуживание, отдых, занятия спортом и др.

Поэтому мне представляется несомненным, что, избежав утраты в процессе «перестройки» большей части объектов социальной сферы, ОКБМ тем самым сохранило этот важный фактор, который в течение ближайших десятилетий будет заметно способствовать полному возрождению и прогрессивному развитию ОКБМ и в новых условиях.

Основные результаты деятельности коллектива ОКБМ в области атомной энергетики

Диффузионные машины (1946–1960 годы)

Будучи в структуре ГМЗ, ОКБ выполнило большой объем научно-технических работ по созданию машин для создаваемых заводов по обогащению естественного урана изотопом U-235. За период 1946–1957 гг. в ОКБ было разработано 25 типов диффузионных машин различной производительности, которые прошли полную отработку, включая изготовление и комиссионные испытания головных образцов. Из них 13 типов выдержали испытания по всем требованиям технических заданий, и девять типов были запущены в серийное производство.

Специалисты ОКБ оказывали большую помощь в обеспечении устойчивой работы каскадов из многих тысяч машин своей разработки, исследовали причины выхода отдельных машин и оперативно разрабатывали соответствующие рекомендации по их устранению, что позволило свести к минимуму нарушения рабочих режимов каскадов.

Промышленные реакторы

ОКБ ГМЗ было привлечено и к созданию первого промышленного реактора для наработки оружейного плутония, который проектировался по проточной схеме. Главным конструктором реактора был Н.А. Доллежалъ. ГМЗ было поручено изготовление ряда основных сборок реактора: технологических каналов, механизмов загрузки–выгрузки топлива, обработка графитовых блоков и др. Наиболее сложной сборкой был механизм разгрузки реактора.

При изготовлении разгрузочных механизмов выявился недостаток конструкции, который был отнесен к числу недопустимых. В связи с этим ГМЗ было поручено разработать свою (новую) конструкцию. Руководство завода поручило эту работу ОКБ, и она была выполнена в требуемом объеме, включая заводские испытания, в кратчайшие сроки. Ответственность выполняемой работы подтверждается

тем, что комиссию, проводившую испытания системы, возглавлял И.В. Курчатов, который и утвердил чертежно-техническую документацию с учетом некоторых замечаний по результатам комиссионных испытаний, которые были учтены при изготовлении штатных механизмов разгрузки реактора. Эти механизмы без замечаний отработали 39 лет до вывода реактора из эксплуатации в 1987 г.

Участие ОКБ и ГМЗ в целом в создании отдельных видов оборудования первого промышленного реактора явилось началом становления и развития нового технического направления — реакторостроения в деятельности ОКБ и атомного машиностроения на нижегородской земле.

Практически сразу же после пуска в 1948 г. первого промышленного реактора в ОКБ началась работа над проектом новой реакторной установки с уран-графитовым реактором. При этом принципиальная схема была та же, что и на первом реакторе, но в конструкцию реактора и обеспечивающих систем были внесены изменения, учитывающие опыт эксплуатации первого реактора. По разработанной ОКБ документации за период 1949—1952 гг. были построены три новые реакторные установки. Затем в 1958 г. был пущен новый проточный реактор значительно большей мощности, чем предыдущий. Первые двухцелевые реакторы с замкнутой системой охлаждения реактора разработки ОКБМ были введены в эксплуатацию в 1961 г. и успешно работали до 1992 г. С учетом опыта их эксплуатации проектировались и строились более совершенные однотипные реакторы, которые вступили в эксплуатацию в 1964 и 1965 гг. На этом проектирование в ОКБ промышленных уран-графитовых реакторов закончилось. Всего по проектам ОКБМ было построено девять таких реакторов, три из которых работают до настоящего времени, обеспечивая тепловой и электрической энергией города Северск, Томск и Железногорск.

Приведенная информация о проектах реакторных установок, сроках их разработки и вводах в эксплуатацию имеет целью обратить внимание читателя на интенсивность и организацию всего цикла работ по созданию новой техники, что, несомненно, представляет интерес в связи с неизбежностью восстановления разрушенной машиностроительной промышленности, без которой невозможно возрождение экономики нашей страны.

Уникальный опыт, накопленный в нашей стране при создании совершенно новой отрасли — атомной промышленности, безусловно, должен быть учтен и использован в сложившихся в стране условиях, которые она переживает после «перестройки». Конечно, прямое заимствование недопустимо и невозможно, но целый ряд положений принципиальной важности, которые определяли организацию работ

по созданию атомной отрасли, имеет непосредственное отношение к решению жизненно важных проблем восстановления и развития экономики страны в современных условиях.

К числу этих положений относятся:

- опора на науку и ведущих ученых;
- организация тесного рабочего взаимодействия научных учреждений и предприятий промышленности при ведущей роли ученых;
- ограничение роли чиновной бюрократии рамками обеспечения оперативного исполнения принятых решений и строгого контроля за их исполнением;
- создание атмосферы престижности участия научных учреждений, ученых, специалистов в решении важнейших проблем предприятий промышленности.

Я полагаю, что эти положения должны быть в числе руководящих (базовых) при организации работ по возрождению экономики страны.

Тяжеловодные реакторы

В феврале 1949 г. ОКБ ГМЗ получило техническое задание от института научного руководства академика А.И. Алиханова (ныне ИТЭФ) на проектирование тяжеловодного реактора для наработки оружейного плутония. Необходимость второго направления получения плутония диктовалась стремлением максимально экономить естественный уран, реальные запасы которого в стране не были тогда известны. Тяжеловодные реакторы требовали расхода урана в 10–15 раз меньше по сравнению с уран-графитовыми реакторами при прочих равных условиях.

Уже после ознакомления с техническим заданием стало ясно, что создание тяжеловодного реактора будет более сложной задачей, поскольку в задании имелись новые требования (исключение течей тяжелой воды, потеря ее при перегрузке урановых блочков, недопущение взрывных концентраций гремучей смеси, ограничение коррозионных процессов и др.), которые в уран-графитовых реакторах отсутствовали.

Опыта решения соответствующих задач не только в ОКБ, но и в стране в то время не было. Поэтому пришлось привлекать к работе над проектом большое число специализированных организаций. Работа над проектом чрезвычайно усложнялась весьма жесткими сроками, установленными на разработку проекта заказчиком.

Однако к этому времени ОКБ уже имело некоторый опыт по организации скоростного проектирования. С самого начала работ было понимание того, что без широкого экспериментирования создать работоспособную конструкцию тяжеловодного реактора невозможно.

Поэтому одновременно с разработкой проекта реактора велась работа по проектированию стендов для проведения экспериментальных работ, испытаний отдельных узлов, механизмов, систем. Проектирование и изготовление мощных стендов и испытываемых узлов велись опережающими темпами. Этот подход обеспечил возможность в кратчайшие сроки получить необходимую экспериментальную информацию и учитывать ее при выпуске конструкторской документации проекта.

Уже в 1950 г. на строительной площадке начался монтаж основного оборудования первого в СССР тяжеловодного реактора, а 13 октября 1951 г. начался пуск и подъем его мощности. Через несколько дней реактор был выведен на мощность 100 МВт. На начальном этапе эксплуатации выявился ряд сложных проблем и конструктивных недоработок, которые оперативно устранялись по рекомендациям и при непосредственном участии специалистов ОКБ.

Первый промышленный тяжеловодный реактор был выведен из эксплуатации в 1965 г. и затем демонтирован. После успешного в целом ввода в эксплуатацию первого реактора в ОКБ было разработано три новых проекта тяжеловодных реакторов. Два из них после многолетней эксплуатации остановлены и демонтированы. Последний тяжеловодный реактор – двухцелевой, предназначенный для наработки трития и радиоактивных нуклидов, был смонтирован на площадке первого тяжеловодного реактора, введен в эксплуатацию в 1988 г. и продолжает успешно работать. В эти же годы и в ОКБ были спроектированы два исследовательских тяжеловодных реактора: один для Китайской Народной Республики, другой для Югославии. Все оборудование было изготовлено, поставлено заказчикам, выполнены монтаж, наладка и пуск с участием специалистов ОКБ ГМЗ, и эти реакторы в течение многих лет успешно эксплуатировались по назначению.

Оценивая в целом работу по созданию промышленных реакторов первого поколения в 50-х годах и результаты их эксплуатации, нельзя не учитывать условия и политическую обстановку в стране и в мире в целом. В части технологии для создания этих реакторов явно ощущался большой недостаток исходной информации и специалистов-атомщиков, которые еще только формировались в процессе создания первых промышленных реакторов. Восполнение недостающей специалистам информации требовало проведения специальных исследований и, следовательно, дополнительного времени. А обстановка «холодной» войны диктовала чрезвычайно жесткие сроки создания и запуска в эксплуатацию этих реакторов.

Поэтому и заказчики, и конструкторы заведомо исходили из того, что уже на начальном этапе эксплуатации будут выявлены уязвимые решения в конструкции, и необходимо быть готовыми к оперативному их устранению.

Именно эти соображения определили выбор проточной схемы для реакторов первого поколения и недостаточно обоснованные в некоторых случаях конструктивные решения.

Последствия выявленных конструктивных недостатков приходилось оперативно, порой в тяжелых условиях, устранять по рекомендациям проектантов и конструкторов эксплуатационному персоналу. При этом работу необходимо было выполнять в сжатые сроки.

И сейчас, оглядываясь назад, с удовлетворением можно констатировать, что жизненно важные для страны задачи были решены своевременно за счет эффективной организации работ, самоотверженной работы исполнителей разных специализаций и в том числе за счет принятых волевых решений, которые в ряде случаев в нормальных (не военных) условиях нельзя было бы считать приемлемыми.

Судовые ЯЭУ

В ноябре 1953 г. Правительство СССР приняло постановление о разработке мощного ледокола с ядерной энергетической установкой. Ледокол предназначался для проводки транспортных судов по Северному морскому пути и по высокоширотным трассам Арктики. Экономическая целесообразность строительства такого ледокола обосновывалась исключительной значимостью приполярных регионов и морских шельфов Арктики для перспективного развития СССР. Разработка проекта ядерно-энергетической установки (ЯЭУ) была поручена ОКБ ГМЗ, научное руководство было возложено на ИАЭ (ныне РНЦ «Курчатовский институт»).

Уже в мае 1954 г. комиссия под председательством научного руководителя А.П. Александрова рассмотрела предложения ОКБ по проекту ЯЭУ, а в июне 1954 г. секция НТС Минсредмаша рассмотрела эскизный проект ЯЭУ и рекомендовала его для разработки технического проекта. Технический проект был утвержден в июне 1955 г. Изготовление основного оборудования ЯЭУ было возложено на ГМЗ по рабочей документации ОКБ. Работа над проектом первой судовой ЯЭУ явилась большой и эффективной школой для коллектива ОКБ, во многом определившей в дальнейшем организационное и структурное развитие нашего предприятия. Именно при разработке этого проекта и его реализации сложились формы творческого сотрудничества между научным руководством и ОКБ, которое в значительной степени определяло успешное решение заданий, поручаемых ОКБ.

При проектировании первой судовой ЯЭУ был найден и внедрен ряд новых технических и физических решений. Например, в активной зоне впервые были использованы выгорающий поглотитель, циркониевые сплавы в качестве конструкционного материала, для компенсации давления применена паровая система с электронагревательными элементами и др.

Хорошо организованная работа на всех этапах проектирования и строительства ледокола обеспечила сооружение первого в мире надводного судна с ЯЭУ в рекордно короткие сроки. Уже в декабре 1959 г. атомный ледокол «Ленин» был передан в опытную эксплуатацию Министерству морского флота СССР.

В процессе эксплуатации атомный ледокол весьма положительно себя зарекомендовал и в проводке грузовых судов по Северному морскому пути, включая раннюю проводку лесовозов на трассе Енисей – Баренцево море, и в высокоширотных экспедиционных рейсах, и в высадке экспедиции дрейфующей станции «Северный полюс-10» и др. За шесть навигаций ледокол провел 457 судов, пройдя во льдах 62 000 миль.

Полученный эксплуатационный опыт позволил выявить узкие места ЯЭУ, лимитирующие ресурс, критические узлы и виды оборудования, некачественные конструктивные решения. Значимость этого опыта трудно переоценить, имея в виду перспективы дальнейшего совершенствования судовых ЯЭУ.

Успешная и эффективная в экономическом плане эксплуатация атомного ледокола «Ленин» обусловила принятие в 1964 г. Постановления Совета Министров СССР о строительстве новых атомных ледоколов с использованием новой усовершенствованной ЯЭУ. В соответствии с этим постановлением было разработано техническое задание на проектирование ЯЭУ. В апреле 1965 г. специальное техническое совещание рассмотрело несколько вариантов ЯЭУ, разработанных в соответствии с техническим заданием, и рекомендовало для дальнейшей разработки блочную ЯЭУ в двухреакторном исполнении с газовой системой компенсации давления. Технический проект ЯЭУ был разработан в конце 1966 г. Демонтажные работы первой ЯЭУ на ледоколе «Ленин» были выполнены в 1967 г., после чего начался монтаж новой установки, который был завершен в апреле 1970 г. После проведения швартовных, ходовых и сдаточных испытаний межведомственная комиссия подписала акт о приеме новой установки на ледоколе «Ленин» и передаче ледокола в эксплуатацию Мурманскому морскому пароходству. Новая установка оказалась базовой и использовалась на ледоколах «Арктика», «Сибирь», «Россия» с некоторыми част-

ными модернизациями, направленными на дальнейшее повышение безопасности, в основном, за счет совершенствования периферийных систем. Учитывая высокий уровень надежности, который демонстрировала в эксплуатации эта установка, на ее основе была разработана однореакторная установка КЛТ-40, которая использовалась на двух ледоколах с уменьшенной осадкой «Таймыр» и «Вайгач», предназначенных для проводки транспортных судов в устьях сибирских рек. В эксплуатации установка КЛТ-40 подтвердила высокую надежность и экономическую эффективность. Она была также использована на ледокольном транспортном судне «Севморпуть». В этом случае уверенность проектантов в надежности ЯЭУ проявилась уже в том, что сразу после ходовых испытаний это судно отправилось из г.Одессы на Черном море во Владивосток на Дальнем Востоке, где эксплуатировалось в течение нескольких лет, а затем было направлено в г.Мурманск для дальнейшей эксплуатации. Многолетний опыт эксплуатации судна «Севморпуть» на международных линиях (Одесса—Вьетнам—Владивосток, Владивосток—Вьетнам, Владивосток—КНДР) и в Арктике продемонстрировал широкие возможности его использования в любых регионах Мирового океана. Следует иметь в виду, что в процессе эксплуатации судно «Севморпуть» и ЯЭУ КЛТ-40 проходили инспекционную проверку иностранными администрациями на соответствие требованиям безопасности международного кода ИМО, и каких-либо претензий, замечаний к ним не было.

Корабельные ЯЭУ

В сентябре 1952 г. было принято Постановление Совета Министров СССР о создании первой подводной лодки с ЯЭУ. Главным конструктором ЯЭУ был назначен Н.А. Доллежал, научным руководителем — А.П. Александров.

В связи с принципиальной новизной проекта Постановлением предусматривалось также создание наземных прототипов лодочных ЯЭУ с реакторами двух типов: реактор с водой в качестве теплоносителя-замедлителя и с жидкометаллическим теплоносителем на основе эвтектического сплава Рb-Vi. Эскизный проект ЯЭУ, разработанный под руководством главного конструктора Н.А. Доллежала, был утвержден в декабре 1954 г.

На стадии технического проекта к работам было привлечено ОКБ ГМЗ. Выполнение рабочего проекта ЯЭУ наземного прототипа почти полностью было возложено на ОКБ ГМЗ при участии специалистов главного конструктора Н.А. Доллежала. Изготовление и поставка оборудования первого контура ЯЭУ возлагались на ГМЗ.

В дальнейшем специализированное подразделение ОКБ ГМЗ осуществляло авторский надзор за монтажом оборудования данной ЯЭУ на заводах-строителях, обеспечивало авторское сопровождение наряду со специалистами главного конструктора в процессе эксплуатации, при ремонте оборудования, выполняло работы с целью повысить ресурсные характеристики. Накопленный опыт создания атомных подводных лодок (АПЛ) и их эксплуатация позволили проектантам совместно с заказчиком существенно откорректировать требования как к ЯЭУ, так и к кораблям в целом. Эти требования касались повышения надежности, живучести, массогабаритных характеристик ЯЭУ, увеличения времени автономного и подводного плавания, комфортности условий для эксплуатационного персонала.

Работы по созданию новой ЯЭУ для АПЛ второго поколения по новым ужесточенным требованиям начались в двух организациях: в организации головного разработчика ЯЭУ АПЛ первого поколения (главный конструктор Н.А. Доллежал) и в ОКБ ГМЗ (главный конструктор И.И. Африкантов). Если Н.А. Доллежал считал необходимым сохранить основные схемно-компоновочные решения ЯЭУ первого поколения подводных лодок и ограничиться модернизацией оборудования и систем, на которых при эксплуатации наблюдались отказы, течи теплоносителя первого контура и другие негативные явления, то И.И. Африкантов поставил задачу существенно оптимизировать схемно-компоновочные решения и создать новое оборудование, отвечающее ужесточенным требованиям по безопасности и надежности. Поисковые исследования и вариантыные разработки, сравнительный анализ на соответствие новым ужесточенным требованиям позволили ОКБ выбрать для разработки и обоснования технического предложения так называемую «блочную» конструкцию установки.

Конструктивные особенности установки этого типа были следующими: блочный узел «реактор-парогенератор» с соединением «труба в трубе», блочный узел «парогенератор-насос первого контура». Большое внимание было уделено вопросам обеспечения безопасности, в частности приняты технические решения по снижению вероятности разгерметизации первого контура, по повышению надежности срабатывания аварийной защиты и систем аварийного расхолаживания.

При рассмотрении технических предложений генеральным заказчиком и проектантами подводных лодок предпочтение было отдано техническому предложению ОКБ ГМЗ для дальнейшего проектирования ЯЭУ, имея конечной целью запуск в серийное производство.

Проектирование велось применительно к разным типам подводных лодок в двух- и однореакторном исполнении ЯЭУ. К числу

важных достижений следует отнести то, что оба варианта установок были разработаны на основе унифицированного оборудования.

Многолетний опыт эксплуатации ЯЭУ второго поколения подтвердил высокую надежность конструктивных решений, что позволило обосновать увеличение назначенного ресурса основного оборудования и систем «в разы» по сравнению с проектом. Из оборудования, в котором проявились существенные недостатки при многолетней эксплуатации, можно отметить только парогенераторы. Это и подвигло в дальнейшем руководство ОКБ к решению взять на себя проектирование парогенераторов применительно к новым проектам корабельных ЯЭУ.

Растущий опыт создания и эксплуатации корабельных ЯЭУ стимулировал появление новых предложений по их использованию и соответственно новых требований к проектам. В частности, требовалось значительное увеличение мощности реактора, минимизация объема трудоемких монтажных работ по установке при строительстве, максимальная унификация ЯЭУ при привязке к объектам различного назначения.

Проектно-конструкторские работы по поиску достаточно оптимальных решений, удовлетворяющих новым требованиям и закончившихся в конце концов рождением ЯЭУ АПЛ третьего поколения, прошли ряд промежуточных этапов. Однако полное завершение работ по проекту ЯЭУ АПЛ третьего поколения было достигнуто только после полной отработки принципиально нового по конструктивным решениям и характеристикам парогенератора (1975 г.). В новом проекте обеспечивалось выполнение всех требований заказчика и проектанта объекта, включая увеличение мощности реактора, транспортабельность блока корпусов с машиностроительных заводов по железным дорогам, максимальную унификацию оборудования; снижение расхода электроэнергии на собственные нужды и др. Кроме того, были существенно снижены металлоемкость, трудоемкость и цикл изготовления ЯЭУ. В части дальнейшего повышения работоспособности ЯЭУ и ее безопасности важнейшим техническим мероприятием явилось последовательное проведение при проектировании политики, направленной на полную автономность реакторной установки при срабатывании аварийной защиты и аварийном расхолаживании реактора.

Проектные решения ЯЭУ допускают ее использование без существенных изменений в однореакторном и двухреакторном исполнении.

Особо следует отметить значимость в этом проекте созданного в ОКБ нового типа малогабаритного парогенератора. Этот парогенератор позволил в два раза увеличить мощность, снимаемую с единицы

объема, по сравнению с известными змеевиковыми парогенераторами при одинаковых условиях, что и позволило сократить число корпусов в блоке. При этом весьма важно, что конструктивные решения позволили разработать технологию для автоматизированного поточного производства парогенераторов, которая была успешно реализована на заводе-изготовителе.

В 1971 г. принято Постановление Совета Министров СССР о строительстве первого в стране надводного корабля с ядерной энергетической установкой — тяжелого атомного ракетного крейсера. Проектирование ЯЭУ было поручено ОКБМ.

Предварительные разработки проекта в ОКБМ начались в 1970 г. В 1972 г. был подготовлен технический проект ЯЭУ, в котором учитывался весь проектный, производственный и эксплуатационный опыт по установкам для атомных подводных лодок и атомных ледоколов. В основу была положена блочная компоновка оборудования, заимствованы главный циркуляционный насос и паровая арматура с ЯЭУ АПЛ третьего поколения. В ОКБМ был разработан проект парогенератора. Швартовые испытания ЯЭУ головного корабля подтвердили проектные технические характеристики и свидетельствовали о том, что самая мощная корабельная ЯЭУ в СССР создана и успешно работает.

Как ранее уже отмечалось, работы по созданию первой в СССР корабельной ЯЭУ для подводной лодки велись по двум независимым техническим направлениям. В одном случае предполагалось создание ЯЭУ на основе реактора с тепловым спектром нейтронов и водой в качестве теплоносителя-замедлителя, в другом — на основе реактора с эпитепловым спектром нейтронов и жидкометаллическим теплоносителем Pb-Bi.

У каждого из этих направлений были свои достоинства и недостатки. В первом случае очевидным достоинством являлась относительно глубокая изученность, большой накопленный опыт использования воды как теплоносителя в разнообразных системах бытового и промышленного назначения. К числу недостатков воды в первую очередь относится низкая температура кипения при атмосферном давлении — 100 °С. Поэтому для обеспечения приемлемого КПД термодинамического цикла необходимо повышение давления в реакторе более 10 МПа, что приводит к существенному усложнению конструкции реактора, входящего в него оборудования и ЯЭУ в целом. При использовании жидкометаллического теплоносителя (эвтектический сплав Pb-Bi) нет необходимости повышать давление в реакторе, поскольку температура его кипения при нормальном давлении 1700 °С и необходимая температура теплоносителя на выходе из реактора

достигаются при атмосферном давлении. Однако полное отсутствие информации о теплофизических, эрозионных и коррозионных свойствах сплава Pb-Bi, особенностях его взаимодействия с конструкционными материалами, о стабильности физико-химических свойств теплоносителя и условиях их поддержания в процессе эксплуатации заведомо вынуждали разработчиков ЯЭУ ориентироваться на необходимость разнообразных глубоких и дорогостоящих исследований с целью создать исходную базу для обоснованного принятия проектных и конструктивных решений.

Кроме того, такие особенности сплава Pb-Bi, как повышенная температура плавления (127,5 °С), образование при нейтронном облучении весьма токсичного изотопа полония ^{210}Po , заведомо усложняли и проектные решения, и эксплуатацию.

Несмотря на отмеченные выше специфические трудности создания ЯЭУ с теплоносителем Pb-Bi, коллективом исследователей, разработчиков из ФЭИ, ОКБМ и ряда других научных организаций под научным руководством А.И. Лейпунского был выполнен весьма широкий круг исследований, поисковых разработок, испытаний образцов основного оборудования и обеспечивающих систем, позволивших разработать технический проект ЯЭУ с соответствующим обоснованием.

Проект подтвердил реальность создания однореакторной ЯЭУ с теплоносителем типа Pb-Bi, которая имела оптимальные массогабаритные показатели (недостижимые для того времени в ЯЭУ на воде), имела высокую маневренность и отвечала всем требованиям технического задания (за исключением шумности).

После рассмотрения технического проекта в установленном порядке он был утвержден с решением о запуске в производство.

Эксплуатация серийных объектов с ЯЭУ на жидкометаллическом теплоносителе Pb-Bi подтвердила проектную эффективность схемных и конструктивных решений по оборудованию и ЯЭУ в целом. Значительное число этих решений было признано изобретениями. Работа над созданием этой установки стала важным этапом в развитии ОКБМ, поскольку значительная часть конструкторов, технологов и специалистов фактически прошли трудную школу поиска достаточно эффективных решений и их обоснования в новой технической области при отсутствии каких-либо аналогов и прототипов. Выполнение большого объема научно-технических исследований, проведение представительных испытаний нового оборудования потребовали создания уникальной экспериментальной и исследовательской базы в ОКБМ.

Однако успешная в целом эксплуатация серийных подводных лодок выявила такие существенные недостатки, как значительно более сложные условия поддержания подводной лодки в межпоходовой

период на базе, по сравнению с ЯЭУ на воде, а также повышенная шумность. Но следует иметь в виду, что пути преодоления отмеченных недостатков достаточно понятны. Накопленный опыт и соответствующие знания по использованию жидкометаллического теплоносителя, несомненно, обогатили научно-технический потенциал возможностей ОКБМ как создателя ЯЭУ принципиально различных конструкций и различного назначения.

Быстрые реакторы-размножители

Исследования по созданию реакторов, в которых цепная реакция поддерживается за счет деления незамедленными нейтронами с большой энергией (быстрые нейтроны), начались в СССР в самом конце 40-х годов по инициативе А.И.Лейпунского.

Теоретически была доказана принципиальная возможность реализации в таких реакторах расширенного воспроизводства делящихся нуклидов ядерного топлива за счет существенно большего, чем в тепловых реакторах, количества избыточных нейтронов.

Благодаря избытку нейтронов интенсифицируется процесс накопления в уране нового ядерного горючего – плутония, что многократно (до 100 раз) повышает эффективность энергоиспользования природного урана. Практическая значимость этого физического свойства быстрых реакторов выдвигает их на особое место в атомной энергетике. Ведь запас делящихся нуклидов на нашей планете, пригодных для промышленного использования, ограничен, что не позволит создать крупномасштабную атомную энергетику на основе тепловых реакторов.

В ФЭИ были развернуты обширные научно-технические исследования и разработки с целью получить базовую информацию для обоснования технического задания на разработку проекта опытного энергетического реактора на быстрых нейтронах.

В августе 1960 г. принято Постановление Совета Министров СССР о создании первого опытно-промышленного реактора-размножителя тепловой мощностью 1000 МВт. Проектирование реакторной установки при научном руководстве ФЭИ было возложено на ОКБ ГМЗ*. По рекомендации ФЭИ в качестве теплоносителя на основе проведенных теоретических и эксплуатационных исследований был выбран жидкий натрий. Эта рекомендация, хотя и обоснованная, существенно усложнила решение поставленной перед ОКБ задачи. Специфические особенности натрия, и в первую очередь его химическая активность,

* Первоначально проект этого реактора разрабатывался в НИИ-58 под руководством главного конструктора В.Г. Грабина

требовали тщательного учета и обоснования при выборе схемы установки и при проектировании любого оборудования, работающего в среде натрия, его паров или контактирующего с ним.

Необходимость гарантированного исключения радиоактивного загрязнения вырабатываемого пара и турбины определила выбор трехконтурной схемы передачи тепловой энергии в установке, что, несомненно, привело к усложнению и удорожанию ЯЭУ с натриевым теплоносителем.

С самого начала работы над проектом стала очевидной необходимость освоения в ОКБМ натриевой технологии, создания большого числа специальных стендов для проведения исследований и испытаний с натрием элементов конструкций и оборудования в целом, удовлетворяющих всем требованиям безопасности из-за их повышенной пожароопасности. При создании натриевых стендов ОКБМ опиралось на опыт и эффективную помощь специалистов ФЭИ. Результатом интенсивных усилий явилась реализация схемы экспериментальной отработки создаваемого натриевого оборудования: поузловая проверка – опытный образец – слаточные испытания штатного оборудования.

Хорошо продуманная организация работ по проектированию и созданию ЯЭУ с реактором на быстрых нейтронах и натриевым теплоносителем позволила в относительно короткие сроки разработать технический проект и создать оригинальное, в основном, надежное оборудование.

Энергопуск ЯЭУ БН-350 состоялся в июле 1973 г. Но ненадежными оказались испарители парогенераторов: они не удовлетворяли требованиям герметичности (проект ОКБ «Гидропресс»). Для устранения потребовался большой объем ремонтных работ с заменой труб в испарителях (кстати, заметим, что почти во всех типах ЯЭУ на критическом пути оказываются парогенераторы, что обусловлено исключительно сложными условиями работы их теплообменной поверхности). После устранения недостатков в парогенераторах, ЯЭУ БН-350 устойчиво работала на разных уровнях мощности (до 750 МВт). Коэффициент использования ее установленной мощности составлял 0,85.

Стабильная работа установки позволила провести ряд важных экспериментов и исследований, включая исследования, направленные на повышение безопасности и экономичности энергоблока. Полученный опыт эксплуатации оборудования, систем, результаты дополнительных экспериментов создали хорошую базу данных для проектирования и создания более совершенных в техническом и экономическом отношении ЯЭУ с реакторами на быстрых нейтронах.

В 1993 г. закончился проектный (назначенный) срок службы реактора БН-350. Однако состояние всех систем позволяло продлить срок службы энергоблока, опираясь на ежегодные проверки состояния оборудования и систем. Организации главного конструктора (ОКБМ) и научного руководителя (ФЭИ) ежегодно в установленном порядке продлевали эксплуатацию до 1998 г. Затем было принято решение о выводе установки из эксплуатации.

Следует иметь в виду, что вывод из эксплуатации ЯЭУ БН-350 вплоть до утилизации является также важной в научно-техническом и экономическом плане работой, поскольку полученный опыт будет учитываться проектантами аналогичных установок, а также при планировании их вывода из эксплуатации.

Следующим шагом в совершенствовании ЯЭУ с реакторами на быстрых нейтронах был проект ЯЭУ с реактором БН-600. Одним из проектных решений в установке БН-350, который беспокоил самих проектантов, являлась петлевая компоновка оборудования реакторного (первого) контура, для которой характерна большая разветвленность контура, что, безусловно, повышает вероятность нарушения его герметичности и, как следствие, аварийной течи радиоактивного натрия. Стремление проектантов к уменьшению разветвленности первого контура и привело к заключению о целесообразности разработки так называемого «интегрального» реактора БН-600, в котором все оборудование первого контура, включая активную зону, три насоса, шесть промежуточных теплообменников, механизмы перегрузки, размещается в корпусе реактора и погружено в натриевый теплоноситель.

Переход к интегральной компоновке, которая позднее получила статус изобретения, породил ряд новых, по сравнению с БН-350, научно-технических задач, потребовавших поиска новых проектных и конструктивных решений, создания новых видов оригинального оборудования.

Увеличение мощности реактора по сравнению с БН-350, повышение температуры натрия на выходе из реактора и параметров вырабатываемого пара обусловили существенное повышение технико-экономических показателей установки. Но практическая реализация требовала проведения большого объема научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, часть из которых не имела прецедентов, ресурсных испытаний оборудования и др. Выполнение НИОКР, создание и изготовление оборудования, строительные и монтажные работы при строительстве этого реактора на третьем энергоблоке Белоярской АЭС определялись рядом дополнительных правительственных постановлений. Энергопуск

установки с реактором БН-600 состоялся в апреле 1980 г., на номинальную мощность реактор был выведен в декабре 1981 г.

На всем этапе строительно-монтажных и пусковых работ ОКБМ обеспечивало авторский надзор и принимало участие в решении возникающих вопросов, брало на себя выполнение ряда ответственных работ, таких как тензометрирование корпуса реактора при первом разогреве перед заливкой натрия в реактор, виброизмерения внутрикорпусных конструкций и др., а также в наладке механизмов СУЗ, насосов, в гидравлических и тепловых испытаниях активной зоны и контуров.

Многолетняя (более 22 лет) успешная эксплуатация ЯЭУ с интегральным реактором БН-600 подтвердила его высокую эксплуатационную работоспособность, надежность и безопасность, что обеспечивало стабильную плановую выработку электроэнергии и отпуск тепловой энергии (для коммунальных целей) с показателями, не уступающими лучшим серийным ЯЭУ других типов. Одновременно эксплуатация БН-600 подтвердила:

- высокую эффективность технических решений, направленных на предупреждение и локализацию течей в натриевых контурах;
- наличие резервов для дальнейшего повышения термодинамической эффективности и технико-экономических показателей РУ.

В целом опыт разработки, создания и эксплуатации энергоблока с интегральным реактором БН-600 открыл путь для создания эффективных промышленных ЯЭУ с быстрыми реакторами-размножителями и определил технические направления совершенствования их технико-экономических показателей в целях обеспечения конкурентоспособности с энергоисточниками других типов.

Не случайно проект ЯЭУ БН-600 и опыт ее эксплуатации постоянно вызывали повышенный интерес у зарубежных специалистов. В рамках советско-французского сотрудничества еще в 80-е годы был проведен обмен технической документацией проектов БН-600 и «Супер-Феникс». На коммерческой основе Японии были переданы материалы по проекту и опыту эксплуатации БН-600.

Положительный опыт создания и эксплуатации ЯЭУ БН-600 и выявленные возможности повышения мощности реактора стимулировали проведение соответствующих проектных работ по созданию ЯЭУ большей мощности БН-800, используя оправдавшие себя решения по оборудованию и системам БН-600 и выявленные избыточные запасы. При этом в полной мере учитывался эксплуатационный опыт реакторов БН-350 и БН-600.

Одновременно ставилась задача повысить уровень безопасности с учетом постулируемых запроектных аварий и улучшить технико-экономические показатели за счет оптимизации состава оборудования,

топливной составляющей, снижения металлоемкости и др. Такой подход к проектированию позволял ограничиться минимальным объемом дополнительных исследовательских и опытно-конструкторских работ.

Из опыта создания ЯЭУ БН-350 и БН-600 и разработки проекта БН-800 следовало, что слабым местом этих установок являются экономические показатели: существенное превышение (на 20–30 %) капитальных затрат по сравнению с ЯЭУ на основе реакторов типа ВВЭР. Это превышение обусловлено увеличенной металлоемкостью энергоблока в результате использования трехконтурной схемы РУ вместо двухконтурной и модульных парогенераторов.

Выполненные исследования и разработки на уровне технического проекта ЯЭУ БН-600М (проект модернизации БН-600) и сравнительный технико-экономический анализ показали, что за счет оптимизации трехконтурной схемы, конструкции оборудования промежуточного контура и систем перегрузки, перехода к корпусному парогенератору, превышение капитальных затрат по отношению к ВВЭР-1000 сходит на нет.

Тщательный технико-экономический анализ, проводившийся в процессе проектирования БН-800 и БН-600М, обеспечил получение исходных условий для перехода к испытаниям и разработкам проекта ЯЭУ с реактором типа БН мощностью 1600–1800 МВт(э). Если при создании ЯЭУ БН-600 на переднем плане были вопросы безопасности, надежности, работоспособности, в БН-800 – вопросы частичной технико-экономической оптимизации за счет выявившихся избыточных запасов в оборудовании и системах, то при создании БН-1600 – 1800 решающее значение стали играть экономические показатели (наряду с безопасностью).

Работа над проектами ЯЭУ с реакторами-размножителями с натриевым теплоносителем стала большой творческой школой для значительной части коллектива ОКБМ. Особенности этой работы определялись рядом специфических условий, а именно:

- отсутствием на начальных этапах каких-либо прототипов и информации по зарубежным работам;
- повышенной химической активностью натрия, бурно реагирующего с водой, парами воды и атмосферным воздухом, что требует разработки специальных технических мероприятий;
- спецификой нейтронно-физических характеристик реакторов типа БН, сказывающейся и на решении вопросов безопасности;
- чрезвычайно большим объемом необходимых экспериментальных работ и испытаний оборудования.

Учет указанных особенностей обусловил появление определенной схемы обоснования конструктивных решений и оборудования,

которая включала на первых порах испытания в натриевой среде как обязательное условие. Это привело к созданию представительной и эффективной экспериментальной базы в ОКБМ и соответственно кадров, овладевших техникой и культурой проведения таких экспериментов.

Очень важным оказалось осознание необходимости обосновывать представительность проводимых экспериментов и испытаний. После реализации проектов и получения первых результатов эксплуатации появилась возможность доложить их на соответствующих международных встречах, сравнить наши решения с иностранными, провести дискуссии с зарубежными специалистами. Это было весьма важно для коллектива, поскольку мы вскоре убедились в правильности нашего подхода к поиску и обоснованию проектных решений, что несомненно способствовало самоутверждению специалистов ОКБМ.

Малая атомная энергетика

Накопленный опыт проектирования, создания и эксплуатации ЯЭУ различного назначения подтвердил возможность более широкого использования атомной энергетике с обеспечением всех требований безопасности, исключения недопустимых воздействий на окружающую среду.

В начале 1977 г. по инициативе академика А.П.Александрова у меня с ним состоялся разговор о целесообразности и технической возможности создания, как он выразился, «атомной котельной». В результате обсуждения мы пришли к заключению, что целесообразность создания такой системы с учетом климатических и географических особенностей нашей страны не должна вызывать сомнений, поскольку экологические требования, необходимость экономного расходования ресурсов органического топлива, транспортные проблемы с поставкой топлива, организационно-технические сложности управления сотнями мелких котельных и их обслуживания в крупных городах однозначно свидетельствуют о целесообразности создания «атомных котельных», если они будут удовлетворять требованиям гарантированной безопасности и обеспечивать приемлемую стоимость генерируемой тепловой энергии. Возможно ли технически выполнить эти условия?

На этот вопрос я высказал следующие соображения: если все проектирование такой системы, то есть «атомной котельной», подчинить требованию гарантированной безопасности, то она, безусловно, может быть создана, но что при этом получится с таким показателем как себестоимость генерируемой тепловой энергии, можно узнать, подождав хотя бы эскизной стадии проекта. На известных к настоящему

времени решениях гарантированную безопасность «атомной котельной», по-видимому, не обеспечить. Потребуется поиск новых решений. Анатолий Петрович согласился с этими соображениями.

При обсуждении был задан и такой вопрос: почему надо проектировать именно котельную? Ведь с точки зрения экономической эффективности более выгодно иметь не котельную, поставляющую только тепловую энергию для коммунальных нужд (отопление и горячее водоснабжение), а станцию, вырабатывающую и электрическую, и тепловую энергию для отопления, и горячую воду для бытовых целей. Такое решение сняло бы вопрос о сезонной зависимости режима работы котельной.

После принципиального обсуждения Анатолий Петрович подвел итог в следующей форме. Имеется один фактор, с которым нельзя не считаться, а именно — настороженность широкой общественности к строительству атомных станций, тем более при размещении их в непосредственной близости к городам, а атомные котельные должны размещаться именно так, чтобы ограничить стоимость магистральных теплопроводов до разумного уровня. Поэтому необходима полная гарантия безопасности. Это, безусловно, проще обеспечить для атомной котельной, поскольку рабочие параметры (давление, температура) у нее будут много ниже по сравнению с атомной ТЭЦ (АТЭЦ). А переход к АТЭЦ, несомненно, состоится как естественный процесс технико-экономического совершенствования, и после успешной работы атомной котельной он не вызовет остро негативной реакции у широкой общественности.

Позднее академик А.П. Александров имел встречу с председателем Совета Министров СССР А.Н. Косыгиным, на которой было в принципе одобрено предложение о развитии нового направления в атомной энергетике, что сулило целый ряд экономических, экологических и организационно-технических преимуществ. Уже в апреле 1977 г. министром среднего машиностроения Е.П. Славским было дано указание развернуть в ОКБМ при научном руководстве ИАЭ им. И.В. Курчатова работы по созданию ЯЭУ для атомной станции теплоснабжения.

Коллектив ОКБМ воспринял новую задачу с пониманием. Предстояло, опираясь на имеющийся опыт создания ЯЭУ для судов, кораблей и АЭС, найти новые оригинальные проектные и конструкторские решения для создания ЯЭУ с гарантированной безопасностью и себестоимостью отпускаемой теплоты, не превышающей себестоимость теплоты традиционных котельных на органическом топливе.

Поиск завершился формулированием технической идеологии, основу которой составляли трехконтурная схема передачи теплоты ЯЭУ и интегральный реактор с естественной циркуляцией теплоносителя.

Основные решения, имеющие принципиальное значение, сводились к следующему:

- интегральный реактор, вмещающий весь объем теплоносителя первого контура, что практически исключает возможность его течи во внешнюю среду, поскольку вероятность нарушения герметичности корпуса реактора ничтожна;
- реактор заключен в герметичный страховочный корпус, рассчитанный на давление, несколько превышающее максимальное давление в случае постулированной разгерметизации корпуса реактора;
- конструкция активной зоны выбрана из условия реализации отрицательных обратных связей, обеспечивающих внутреннюю самозащищенность реактора;
- давление среды в промежуточном контуре во всех режимах работы и аварийных ситуациях остается меньше рабочего давления в сети потребителей теплоты, что гарантированно исключает попадание радиоактивности к потребителю в случае аварийной разгерметизации первого контура. Таким образом, промежуточный контур является дополнительным (практически непреодолимым) барьером против радиоактивного загрязнения сетевой воды;
- все системы безопасности, включая органы защиты, системы аварийного расхолаживания, удовлетворяют требованиям разнообразия, срабатывают и функционируют без вмешательства человека на пассивных принципах.

А.Н. Косыгин проявлял большой интерес к ходу разработки проекта. Поэтому, когда определились основные проектно-конструкторские решения, А.П. Александров пригласил А.Н. Косыгина в ИАЭ, где я без излишней детализации рассказал об основных проектно-конструкторских решениях, их специфичности, новизне. А.Н.Косыгин задал несколько вопросов, касающихся безопасности. Он одобрил введение промежуточного контура, наше стремление к увеличению доли монтажных работ, выполняемых в заводских условиях.

В мае 1979 г. технический проект атомной котельной АСТ-500 в установленном порядке был рассмотрен и утвержден для рабочего проектирования. Вскоре после этого появилось постановление правительства, в котором были обозначены 10 крупных городов, в которых должно было планироваться строительство атомных котельных – атомных станций теплоснабжения (АСТ).

Специфическое назначение атомной котельной, ужесточенные требования по безопасности и надежности, оригинальность проектных и конструкторских решений потребовали скрупулезной отработки систем и оборудования, их представительной экспериментальной проверки и испытаний. Для этого в процессе проектирования было

создано и задействовано большое число стендов. Одновременно росла и квалификация исполнителей, что дало возможность специалистам ОКБМ оказать эффективную помощь предприятиям-изготовителям оборудования в подготовке и освоении производства, при изготовлении, монтаже и сборке. Не случайно ряд предприятий присылали благодарственные письма в адрес ОКБМ, в которых отмечалась высокая эффективность авторского надзора, компетентность и оперативность специалистов в решении технических и организационных вопросов.

Работы по монтажу оборудования первого реакторного блока на Горьковской АСТ продолжались до марта 1990 г. Готовность пускового комплекса первого блока к этому времени превышала 80 %. С некоторым отставанием аналогичные работы велись и на строительстве Воронежской АСТ. Но еще в середине 1988 г. были инициированы так называемые общественные движения в г. Горьком и в г. Воронеже за прекращение строительства атомных котельных. Нашлись на местах лидеры, которые, не гнушаясь никакими средствами, пытались сделать политическую карьеру, используя для этой цели необоснованные страхи, неосведомленность людей в особенностях проекта АСТ. В воздействии на общественное мнение широко использовалась тема Чернобыльской аварии, оказавшей огромное влияние на умы людей и сформировавшей у населения прочное неприятие всего «атомного».

В сложившихся условиях в 1988 г. правительство приняло решение просить МАГАТЭ провести независимую комплексную экспертизу проекта Горьковской АСТ и ведущегося строительства с привлечением специалистов из разных стран. МАГАТЭ пошло навстречу и организовало экспертную комиссию, включив в нее специалистов из 14 стран (США, Великобритании, Франции, Германии, Италии, Швеции, Канады и др.). Работа экспертов проводилась в два этапа. На первом этапе изучалась проектная документация АСТ с акцентом на решение вопросов безопасности и ее обоснование. На втором этапе инспектировался ход строительно-монтажных работ и степень готовности к эксплуатации непосредственно на станции в г. Горьком.

Для каждого этапа формировалась группа экспертов из специалистов разных стран, работавшая под руководством ответственного представителя МАГАТЭ. Эксперты тщательно изучили материалы проекта, ознакомились со строительными и монтажными работами, обращая особое внимание на качество выполненных работ. Поскольку ведущая часть эксплуатационного персонала станции формировалась из выпускников физико-технического факультета Горьковского политехнического института (ныне НГТУ), то эксперты сочли необходимым ознакомиться с учебными программами, лабораториями на факультете, а также побеседовать с преподавателями.

Комиссия экспертов подвела итоги своей работы и подготовила заключение для Совета Министров СССР. В заключении была дана высокая оценка проекта АСТ и качества выполненных строительно-монтажных работ и, в частности, говорится:

«...Проект выполнен хорошо, в него включены все те характеристики, которые обеспечивают безопасность...

...Конструкторы выбрали верный подход, применив узлы, которые прошли испытания...

...На настоящий момент мы не видим причин, из-за которых станция не может быть пущена...

...Мы считаем — и это единодушное мнение всех членов нашей группы, что проект ГАСТ выполнен на высоком уровне...

...И еще один момент, который произвел на нас большое впечатление, — это количество испытаний, которым подверглось оборудование. В основном, это были крупномасштабные эксперименты. Их число значительно больше, чем обычно проводится на большинстве реакторов на Западе.

К числу достоинств реакторной установки следует отнести также тот факт, что в случае аварии (в системах отвода тепла) отвод тепла с помощью пассивной системы будет продолжаться не менее недели...».

Несмотря на высокую оценку экспертов МАГАТЭ проекта АСТ и качества строительно-монтажных работ, дальнейшие работы по завершению строительства Горьковской и Воронежской АСТ были приостановлены.

В сентябре 1990 г. сессия областного и городского советов народных депутатов г. Горького приняла решение о прекращении строительства ГАСТ. С учетом этого решения председатель Совета Министров СССР подписал постановление о закрытии строительства станции. Незавершенная ГАСТ перешла в муниципальную собственность Горьковской области.

Несколько иначе развивалась ситуация вокруг Воронежской АСТ. На референдуме в 1990 г. большинство жителей Воронежа также высказались за прекращение строительства АСТ, но сооружения станции были оставлены в федеральной собственности. Новая администрация Воронежской области, учитывая нарастающие трудности с теплоснабжением областного центра, стала активно добиваться возобновления строительства АСТ. На основании положительных заключений общественной и государственной экспертизы об экологической безопасности АСТ областная и городская администрации приняли решение о продолжении строительства и пуске станции. Работы возобновились в 1996 г. Однако завершения их, по всей вероятности, придется ждать долго по причине отсутствия финансовых средств.

Печальная судьба уникальных по замыслу и исполнению проектов ГАСТ и ВАСТ, несомненно, является результатом стечения абсолютно непрогнозируемых разрушительных событий, именуемых «перестройкой», в нашей стране, негативные последствия которой будут проявляться не одно десятилетие. Потребуется чрезвычайные меры и усилия, чтобы тенденция саморазрушения, самоистощения, которая так импонирует политикам типа Е. Гайдара, сменилась на противоположную, то есть на тенденцию восстановления, созидания и развития. Но я верил и верю, что такое время настанет. И в этом плане представляется весьма важным, чтобы опыт проектирования и создания этих уникальных энергетических объектов не потерялся, не исчез бесследно, а получил дальнейшее развитие, по крайней мере, при создании реакторов следующего поколения.

Опыт создания атомной котельной, а также судовых и корабельных ЯЭУ убеждает в том, что относительно малая мощность ЯЭУ позволяет использовать такие проектно-конструкторские решения, которые в большинстве случаев заведомо не могут быть применены в установках мощностью около 1000 МВт(э) и более, но для атомных станций относительно малой мощности обеспечивают возможность получения более высоких эксплуатационных показателей, снижения капитальных затрат и другие преимущества.

Географические и климатические особенности нашей страны проявляются в том, что имеется большое число регионов, отрезанных от энергетических и транспортных сетей и испытывающих острую нужду в энергоисточниках (электрическая и тепловая энергия) для обеспечения нормальных условий жизни людей и промышленной разработки богатых минеральных ресурсов, в которых заинтересована страна. И есть основания полагать, что для большей части этих регионов малая атомная энергетика может стать оптимальным решением проблемы.

Кроме того, известно, что в ряде промышленных производств требуется относительно небольшая мощность источника тепловой энергии, но при достаточно высокой температуре, например, в нефтепереработке, производстве органических удобрений, опреснении соленой (морской) воды и др. Поэтому можно ожидать, что с развитием атомной энергетике в будущем будут востребованы специализированные атомные энергоисточники, удовлетворяющие нуждам соответствующих производств.

В ОКБМ, используя опыт создания АСТ-500 и судовых ЯЭУ, был разработан ряд проектов ЯЭУ малой мощности, ориентированных на работу в условиях полной автономности (табл. 1 и 2).

Судовые реакторные установки (РУ), разработанные ОКБМ

Название судна, на котором установлена РУ	Число реакторов, шт.	Тепловая мощность, МВт	Дата пуска в эксплуатацию, год	Фактическая наработка РУ 01.09.2003, тыс. ч	Прогнозируемая дата вывода из эксплуатации РУ, год	Примечание
Ледокол «Ленин»	2	159	1970	107	1989	Выведен из эксплуатации
Ледокол «Арктика»	2	171	1975	142	2007	
Ледокол «Сибирь»	2	171	1977	95	2018	Временно выведен из эксплуатации
Ледокол «Россия»	2	171	1985	96	2011	
Ледокол «Советский Союз»	2	171	1989	74	2018	
Ледокол «Ямал»	2	171	1992	61	2018	
Ледокол «Таймыр»	1	171	1989	95	2012	
Ледокол «Вайгач»	1	171	1990	84	2013	
Контейнеровоз «Севморпуть»	1	135	1988	81	2012	
Ледокол «50 лет Победы»	2	171	2005	-	2031	В стадии строительства
РУ для плавучей атомной ТЭЦ	2	150	-	-	-	Получена лицензия на строительство

**Ядерные установки с водо-водяными реакторами для атомных станций
малой и средней мощности, разработанные ОКБМ**

Характеристика	Числовое значение						ВПБЭР-600
	АСТ-500	АБВ		АТЭЦ			
		АБВ-6М	АБВ-6М (форсир.)	АТЭЦ-80	АТЭЦ-150	АТЭЦ-200	
Тепловая мощность реактора, МВт	500	38	54,7	250	540	750	1800
Мощность энергоблока:							
– электрическая, макс., МВт	-	7,5	12	85	180	250	640
– теплофикационная, макс., Гкал/ч	460	12	21	56	127	375	1030
Тип циркуляции теплоносителя	естественная	естественная		естественная			Принудительная
Параметры пара:							
– давление, МПа	1,2 (вода)	3,14	2,5	4,4			6,38
– температура, °С	158	290	275	295			305
Срок службы, лет	50–60	40–50		50–60			50–60
Реализация	Стадия сооружения	Рабочий проект		Технический проект			Технический проект

При этом учитывалось, что в условиях автономности требуется не только коммунальное теплоснабжение, но и электрообеспечение потребителей, поэтому эти проекты разрабатывались как атомные теплоэлектроцентрали – АТЭЦ.

В табл. 2 приведены характеристики АТЭЦ с реакторами на тепловых нейтронах и водой в качестве теплоносителя-замедлителя. Указанный ряд охватывает широкий диапазон мощности от 6 МВт(э) до 600 МВт(э). Поскольку предусмотрена выработка электрической и тепловой энергии, то температура и давление теплоносителя в реакторе существенно превышают параметры АСТ-500.

Однако конструктивная схема АСТ-500 в основном сохранена: реактор интегральный с достаточно высоким уровнем естественной циркуляции (от 20 до 100 %), страховочный корпус, парогенератор (вместо теплообменника) размещен внутри корпуса реактора, но промежуточный контур исключен. Режим работы АТЭЦ позволяет обеспечить более полное использование тепловой энергии реактора, и тем самым улучшить экономические показатели АТЭЦ. При этом уровень безопасности практически обеспечивается на уровне атомной котельной АСТ-500. ЯЭУ такого типа могут эффективно использоваться и для опреснения морской воды. Соответствующие проработки и необходимые исследования выполнялись в ОКБМ, неоднократно докладывались на симпозиумах и конференциях, в том числе и на международных.

Оригинальным проектом является разработка демонстрационной плавучей атомной ТЭЦ (ПАТЭЦ), основу которой составляет несколько модернизированная ЯЭУ атомных ледоколов. Модернизация в основном направлена на увеличение энергозапаса, времени между перегрузками, ресурсной надежности, сроков службы, совершенствование систем безопасности.

Привлекательность плавучей АТЭЦ заключается в том, что она изготавливается, монтируется, проходит сдаточные и пусковые испытания полностью в заводских условиях. Это обеспечивает значительное сокращение сроков сооружения станции, удешевление монтажных, наладочных и пусковых работ, повышение качества всех операций за счет отлаженных технологий и эффективного контроля, более высокой производственной дисциплины и культуры. В целом изготовление плавучей АТЭЦ «под ключ» в заводских условиях позволит существенно уменьшить капитальные затраты по сравнению с традиционной технологией сооружения АЭС. Возможное исключение наземной инфраструктуры по обращению с отработавшим ядерным топливом непосредственно в местах размещения плавучих АТЭЦ также способствует сокращению затрат и повышает безопасность

перегрузки реактора. Имеются основания считать, что после качественной обработки проектно-конструкторских и технологических решений наша страна при соответствующей торгово-промышленной политике может занять лидирующие позиции на мировом рынке, где число потенциальных покупателей объектов малой атомной энергетики с каждым годом неизбежно будет возрастать. В техническом плане у нашей страны есть все условия не упустить предоставляющуюся возможность усиления своих позиций на международном рынке.

Возможность обеспечения промышленных производств высокотемпературной тепловой энергией (с температурой более 800 °С) в ОКБМ однозначно связали с созданием реактора с гелиевым теплоносителем. Поисковые работы в этом направлении начались в 1970-х годах под научным руководством ИАЭ им. И.В. Курчатова. Был выполнен ряд оригинальных разработок, которые включали реакторы с графитовым замедлителем и шаровыми твэлами, реакторы с кассетной активной зоной со стержневыми твэлами. Передача теплоты для целевого использования в технологическом процессе осуществляется через теплообменники. В результате проработок были выявлены критические узлы и оборудование, необходимые для создания высокотемпературного реактора. Таким критическим оборудованием в первую очередь является высокотемпературный теплообменник, в котором теплота от гелия первого контура передается к гелию второго контура, транспортирующему затем теплоту в рабочий производственный цикл. Критическим элементом в таком теплообменнике является материал трубной системы, рабочие условия которого чрезвычайно сложны. Если ориентироваться на температуры гелия ~ 1000 °С, то при разработке конструкции теплообменника, по-видимому, следует использовать жаростойкие покрытия или керамические материалы. Вокруг этих вопросов, в основном, и шли конструктивная и материаловедческая работы, которые и сейчас нельзя считать законченными.

Другим критическим видом оборудования являются подшипниковые опоры компрессоров. Наиболее перспективным решением по ним представляется переход на электромагнитные подшипники, тем более что соответствующие работы в мире и в ОКБМ ведутся. На Западе эти работы продвинуты до промышленного использования. При положительном решении останется еще проблема материала страховочных подшипников (на случай выбега при обесточивании ЭМП), но это проблема, безусловно, более легкая. Если высокотемпературные реакторы рассматривать как источник тепловой энергии для производства электроэнергии с высоким термодинамическим КПД (~ 50 %), то наиболее перспективной представляется одноконтурная схема с газотурбинным циклом преобразования

энергии, над которой ОКБМ в составе международной группы работает уже несколько лет.

Конверсия

Начавшаяся в стране в середине 1980-х годов «перестройка» и последовавшая за ней полная разруха российской экономики, развал промышленности, особенно оборонных предприятий, в корне изменили условия работы ОКБМ. Фактическое прекращение финансирования по оформленным договорам, отсутствие новых государственных заказов, стремительный рост цен, неопределенность функций министерства, проявление анархических тенденций по изменению функциональных прав и обязанностей на предприятиях, на региональном, ведомственном и государственном уровнях привели и ОКБМ в состояние «быть или не быть».

На первых порах казалось, что можно найти выход, используя идею конверсии для обеспечения занятости предприятия, максимально расширив производство изделий и услуг для перерабатывающих предприятий пищевой, легкой, деревообрабатывающей, нефтегазовой и других отраслей промышленности. С этой целью, ознакомившись с потребностями предприятий Нижегородской области, в ОКБМ в короткие сроки были организованы и выполнены проектно-конструкторские работы по некоторым видам оборудования, в которых предприятия, опрошенные представителями ОКБМ, испытывали острую нужду.

Задача перед службами ставилась так: создаваемое в ОКБМ оборудование должно быть по своим характеристикам не хуже лучших зарубежных аналогов, а по стоимости иметь преимущество или, по крайней мере, не превосходить их цен. Превышение рыночной стоимости могло быть оправдано только в том случае, если важные потребительские качества изделия существенно превышают качества лучших зарубежных аналогов (например, ресурс, срок службы, потребляемая мощность и др.).

Программа работ над каждым видом вновь создаваемого оборудования включала, кроме традиционных проектно-конструкторских работ, также изготовление и испытание головного образца, проектные соображения по подготовке производства для массового выпуска оборудования, экономическое обоснование затрат на создание данного оборудования и себестоимость изготовления, предложения по цене продаж.

В первые годы «перестройки» в ОКБМ был выполнен весьма большой объем организационно-технических работ по созданию

конверсионного оборудования, которое включало:

- насосы для молокоперерабатывающих заводов;
- насосы для нужд городского коммунального хозяйства;
- автоматизированную установку молекулярной дистилляции (АПМД) для очистки от примесей продуктов синтеза витамина А для ПО «Биовитамины» (г. Белгород);
- герметичные насосы для нефтеперерабатывающих предприятий;
- герметичную арматуру для нефтеперерабатывающих предприятий;
- теплообменное оборудование.

Каждый из указанных видов оборудования отвечал требованиям соответствующей программы, определяющим объем работ. Представлялось, что сделано все, чтобы потенциальный покупатель мог судить о товаре не только по проекту, но и по натурному образцу, готовому к работе и допускающему апробацию. Так, при создании довольно сложной автоматизированной установки АПМД мы пошли даже на двухэтапность, поскольку заказчик заверял, что будет заказана не одна установка. На первом этапе изготовили натурный образец компоновки входящих в систему корпусов без их внутреннего насыщения, продемонстрировали заказчику. После его одобрения сделали все насыщение корпусов, спроектировали и изготовили систему автоматизированного управления, выполнили всю наладку, убедились, что обеспечивается высокий вакуум, превышающий требования заказчика, и пригласили заказчика для демонстрации работоспособности системы. После этого демонтировали систему, упаковали и поставили заказчику, где на рабочем месте выполнили монтаж, провели наладку системы, заказчик провел запуск установки и убедился в обеспеченности рабочих характеристик. Установка много лет стабильно работала без каких-либо претензий к ОКБМ, но повторных заказов не было из-за отсутствия финансовых средств.

Кстати замечу, что конверсионное оборудование, созданное ОКБМ и поставленное ряду предприятий, везде себя зарекомендовало положительно при эксплуатации.

Создание установки АПМД, ее успешная эксплуатация еще раз убедили меня в больших потенциальных возможностях коллектива ОКБМ, которые отнюдь не исчерпываются традиционной для нашего предприятия областью техники (атомная энергетика). Следовательно, при умном хозяйском подходе к использованию потенциала ОКБМ (и других аналогичных организаций оборонно-промышленного комплекса) страна могла бы успешно решать большинство задач по насыщению рынка отечественной машиностроительной продукцией высокого качества, в которой нуждаются различные отрасли экономики, не прибегая к затратам на приобретение дорогостоящего

импортного оборудования и не останавливая собственные машиностроительные предприятия.

Однако следует признать, что, несмотря на хорошо продуманную в ОКБМ организацию работ по конверсионному оборудованию, наши надежды на конверсию в целом не оправдались. Мы не могли на начальном этапе представить более или менее верно масштабы, характер и все последствия разрушительной политики перестройки, когда руководством страны сознательно провозглашалось: «Наша задача — разрушать» (Е.Гайдар). А проявлялась эта политика в работе ОКБМ таким образом.

Например, обследование в Нижегородской области показало острую нужду в насосах на молокозаводах. Заключается договор с молокозаводом на поставку необходимых ему насосов на согласованных условиях. В оговоренный срок (1–2 года) ОКБМ готово поставлять насосы, но за это время у молокозавода иссякли все оборотные средства, и он оказался в долгах. И хотя насосы ему очень нужны, он мог их взять только в долг, либо по бартеру. В результате затраты ОКБМ не покрываются, налоги за поставленную продукцию ОКБМ оплатить не может, зарплата коллективу «зависает» и т. д.

Аналогичная картина складывалась с большинством конверсионных работ. Хотя идея конверсии отвечала требованиям технической логики и должна была способствовать безболезненной перестройке экономики, фактическая политика, проводившаяся новым руководством страны, привела к реализации прямо противоположных целей, поскольку все эти годы наша страна, разрушая собственную промышленность, весьма успешно способствовала модернизации и развитию промышленности стран Запада.

История рассудит: являлась ли такая политика результатом безграмотности, недомыслия или осознанным продуманным действием во имя достижения целей, ничего общего не имеющих с подлинными интересами страны.

В эти годы мне пришлось принять участие в ряде масштабных по числу участников совещаний, два из которых именовались как всероссийские, где в той или иной форме рассматривались вопросы восстановления отечественной машиностроительной промышленности. На последних мне пришлось выступать с сообщениями, в которых я излагал свои представления об условиях реанимации нашей промышленности.

Одно из Всероссийских совещаний было посвящено вопросам организации проектирования и производства отечественного оборудования для нефтегазовой отрасли. В своем выступлении я подчеркнул актуальность темы совещания, поскольку значимость нефтегазовой отрасли исключительно велика не только для экономики России, но

и для ее выживания как суверенной страны. Я считал, что, если можно практически обеспечить производство оборудования для нефтегазовой отрасли на отечественных предприятиях, то не исключено, что это будет толчком для реанимации отечественного машиностроения и экономики в целом. Но одновременно подчеркнул, что успешное решение этой задачи в условиях современной России будет задачей чрезвычайной сложности. Это обусловлено:

- размытостью, значительной неопределенностью реальной структуры промышленности;
- отсутствием установившихся экономических и производственных связей между предприятиями, которые зачастую предоставлены самим себе;
- неопределенностью или даже отсутствием проверенных на практике схем государственного управления и контроля применительно к задачам национального масштаба, к каким, безусловно, и относится обсуждаемая задача.

Поэтому для ее решения потребуется поиск и разработка разноплановых мероприятий (организационных, технических и др.), без которых невозможно преодолеть и компенсировать негативные особенности тех условий, в которых предприятия решают эти задачи.

Для успешного решения задачи, по моему мнению, необходимы в первую очередь квалифицированные инженерно-технические и производственные кадры, стабильное финансирование.

Несмотря на то, что за годы перестройки научно-производственному потенциалу, основы которого составляют кадры, нанесен весьма большой ущерб, есть основания считать, что страна еще располагает необходимым минимумом кадров для решения масштабных национальных задач. Я сужу об этом, в частности, и по состоянию ОКБМ на сегодня. А структура и состояние ОКБМ, на мой взгляд, типичны для научно-производственных предприятий военно-промышленного комплекса.

Определяющее значение для решения обсуждаемой задачи имеет организация стабильного и достаточного финансирования. При отсутствии уверенности в обеспечении надежного финансирования не только нецелесообразно, но даже вредно приступать к развертыванию работ, поскольку нельзя допустить компрометации важнейшего начинания среди участников – разработчиков и заинтересованных предприятий. С другой стороны, медлить с кардинальным решением задачи также нельзя, так как время работает против нас. Поэтому в решении финансовой проблемы следует использовать нестандартные подходы, изобретательность, не ориентируясь на бюджетные источники. По-видимому, решение следует

искать на пути создания целевого фонда, с привлечением средств частного капитала, заинтересованных коммерческих организаций и предприятий.

Организационная сложность решения задачи предполагает наличие эффективного управления. Для этого необходимо создание властного органа, наделенного необходимыми правами и возможностями.

Определяющие функции управления:

- выработка оптимальной технической политики в области проектирования и производства оборудования для нефтегазовой отрасли;
- проведение жесткой политики экономии средств и времени при решении проблемы, как необходимое условие снижения себестоимости изготавливаемого оборудования;
- определение очередности решения составляющих задач исходя из располагаемых финансовых средств (при соблюдении требований технической логики);
- утверждение порядка и условий приемки головных (опытных) образцов вновь разработанного оборудования;
- санкционирование запуска оборудования в серийное производство;
- определение порядка сервисного обслуживания оборудования в процессе его эксплуатации.

Важнейшим вопросом в сфере управления является последовательное проведение целостной политики создания оборудования для нефтегазовой отрасли, рассматриваемой как единая производственная система (а не как сумма отдельных частных разработок, не связанных между собой), а также реализация оптимального оснащения отрасли. Для этого необходимо формирование некоторых общих требований, которым и должно удовлетворять все вновь создаваемое оборудование. Такой системный подход будет способствовать более качественной отработке конструкций, технологий изготовления, системы контроля качества, обмену информацией между предприятиями и, в конечном счете, минимизации финансовых затрат.

Высказанные мной соображения нашли положительный отклик среди участников конференции. Во многих последующих выступлениях докладчики в той или иной форме касались затронутых мной вопросов. Однако за прошедшие несколько лет после конференции заметных изменений в решении проблемы отечественного производства оборудования для нефтегазовой отрасли не произошло.

Потерпев неудачи с конверсией в ОКБМ и убедившись, что они имеют общий для нашей страны характер, мы были вынуждены искать другие пути и средства выживания организации.

В это время в стране разрасталось движение по организации различных акционерных обществ, частных мелких предприятий.

Это коснулось, конечно, и ОКБМ. Препятствовать этому было нельзя не только потому, что движение насаждалось сверху, но и потому, что в тот период ОКБМ не могло хотя бы на минимально необходимом уровне оплачивать труд своих сотрудников из-за отсутствия заказов на работы по основной для ОКБМ тематике.

Такое состояние приводило к дезорганизации коллектива, рассеянию творческого потенциала. В начале 1990-х годов предприятие потеряло половину своего состава. Некоторые специалисты увольнялись, что называется, со слезами на глазах. Один из них, конструктор от Бога, говорил мне буквально следующее: «Я душой и сердцем с ОКБМ, работа здесь была для меня радостью, удовольствием, но у меня двое детей, жена сейчас не работает, а на то, что Вы платите, не проживешь». Я спросил его: «Куда уходите?». Он ответил: «В банк». – «Но ведь это совсем не Ваш профиль», – отреагировал я. Он на это сказал: «Марка ОКБМ в Нижнем Новгороде весьма ценится, и они считают, что я им подхожу». Кстати, в банке этот специалист сделал весьма успешную карьеру.

Новый путь выживания для ОКБМ мы нашли, предложив свои услуги по атомной энергетике некоторым фирмам зарубежных стран. К этому времени заметно понизился режим секретности, открылся доступ в Н.Новгород иностранцам, в печати стали открыто писать об ОКБМ. До перестройки название ОКБМ в открытых документах не упоминалось. При поездках за рубеж я именовался профессором ГПИ, каковым я и был в действительности, но по совместительству. Выяснилось, что, несмотря на закрытость ОКБМ, за рубежом о нас знают. По-видимому, этому очень способствовала международная экспертиза МАГАТЭ проекта атомной станции теплоснабжения АСТ-500, в которой, как я уже упоминал, участвовали специалисты из 14 стран.

В результате контактов по тематике атомной энергетике у нас появились контракты на проектирование, испытания, на информацию об эксплуатации атомных ледоколов, реактора БН-600. Эти контракты позволили стабилизировать финансовое положение предприятия, приостановить утечку кадров. В ОКБМ по-прежнему появлялись конверсионные работы в планах подразделений, но они имели эпизодический характер, хотя потребность в изготавливаемом ОКБМ оборудовании, несомненно, имеется. Ограниченность заказов со стороны, по моему мнению, объясняется отсутствием в стране масштабных мероприятий по модернизации предприятий промышленности и вложению соответствующих финансовых средств. Думать, что идея конверсии предприятий военно-промышленного комплекса может решаться в отрыве от модернизации промышленности в целом, то есть без государственной поддержки, было бы наивно.

Об отношении к атомной энергетике и доверии к науке

Историю развития человеческой цивилизации с определенными оговорками можно изложить как историю развития энергоисточников. Это объясняется тем, что каждая существенная ступень, на которую поднималось общество, было связано с качественным и количественным изменением в энергопотреблении, появлением новых видов источников энергии.

Мне представляется, что появление человека в современном его понимании оправдано связывать с зажжением им первого костра. Все последующие энергоисточники (животная тяговая сила, рабская сила, парус, водяная и ветряная мельницы, паровые двигатели, двигатели внутреннего сгорания, электрогенераторы и др.) в определенном смысле обязаны своим появлением первому костру и природной изобретательности человека. Культура на каждом историческом этапе общества в основе своей определялась располагаемыми видами энергоисточников. Хотя известно, что общество далеко не всегда встречало появление нового энергоисточника с распростертыми объятиями.

Каждый новый энергоисточник приводил к существенным изменениям общества, его инфраструктуры, социальной сферы и культуры в целом. Появление атомной энергетике также неизбежно приведет к существенным изменениям во всех сферах общества.

Но нужна ли обществу атомная энергетика? Является ли она неизбежностью или одной из многих возможностей, предложенных наукой, но не востребованных обществом? Здесь будет уместно вспомнить, что Э. Резерфорд, открывший планетарную модель атома, на вопрос журналистов в 1908 г. о возможности использования внутриатомной энергии дал отрицательный ответ.

В работах Римского клуба и других исследователей обозначены следующие факторы, определяющие необходимость атомной энергетике:

- продолжающийся рост численности населения и соответственно опережающий рост энергопотребления;
- неизбежное исчерпание запасов органического топлива;

- перманентный рост стоимости органического топлива;
- загрязнение воздуха и окружающей среды в целом, в первую очередь, в результате сжигания органического топлива.

Атомная энергетика в принципе лишена большинства перечисленных недостатков.

При использовании в структуре атомной энергетики реакторов-размножителей запасы ядерного топлива могут считаться практически неисчерпаемыми. Воздействие на окружающую среду со стороны объектов энергетики в принципе может и должно быть исключено.

Известные факты недопустимого воздействия на окружающую среду со стороны объектов атомной энергетики (аварии на АЭС «Три-Майл-Айленд», Чернобыльской и др.) были результатом грубых организационно-технических нарушений.

И сейчас, несмотря на то, что к настоящему времени около 17 % мирового производства электроэнергии обеспечивается атомными электростанциями, дискуссии о целесообразности и необходимости развивать атомную энергетику продолжаются. Чем это обусловлено?

Мне представляется, что это присущая всему животному миру, включая человека, боязнь принципиально нового, которое несет неведомые опасности, а в случае атомной энергетики – вначале не ощущаемые непосредственно человеком ионизирующие излучения, совершенно неизвестные широкой общественности, которые, однако, подвергают опасности здоровье и даже жизнь человека.

Эти страхи укрепляются широко распространяемой информацией о массовой гибели людей при атомной бомбардировке городов Японии, о катастрофических последствиях Чернобыльской аварии, взрыва на атомном предприятии на Урале и др. К сожалению, такая информация часто является полуправдой, поскольку она излагается без опоры на научную базу. И это не всегда объясняется нежеланием или недобросовестностью журналиста-информатора. Дело в том, что изложение событийной информации в достаточно строгом соответствии с научным представлением о событии и в форме, доступной для широкой общественности, во многих случаях практически невозможно.

Поэтому возникает острая необходимость воспитывать у общественности необходимый уровень доверия к научным заключениям и рекомендациям. Это относится не только к атомной энергетике, ее научному сопровождению и ученым-атомщикам, но и к другим стратегическим направлениям развития нашей цивилизации. Ведь по всем изменениям, которые переживает мир в наше время, подчеркивается принципиальное положение – опираться на науку при подготовке и реализации любых значимых решений. Поскольку наш мир весьма

усложнился, то приемлемых решений по проблемным вопросам (особенно стратегической важности) без строго научного обоснования выработать невозможно. А это предполагает обязательно определенную степень доверия к науке и ученым со стороны общества.

И нет никаких оснований исключать из большого ряда принципиальных по значимости нововведений, которые мир переживает или готовится пережить, такое нововведение как атомная энергетика, развитие которой по своим последствиям будет иметь огромное значение для мировой цивилизации.

Почему необходима принципиальная постановка вопроса о доверии к науке?

Дело в том, что в настоящее время сложность научных результатов, положений, методологии вырабатываемых заключений настолько выросла, что неподготовленному читателю газетных публикаций составить объективное суждение о значимости и обоснованности того или иного предложения невозможно. Этим широко пользуются многие политики, которые в своих выступлениях с легкостью опровергают научно-технические предложения или призывают к каким-либо недопустимым действиям, если это им выгодно из корыстных или политических соображений. Достаточно вспомнить организованные общественные движения за прекращение строительства АСТ в г. Горьком (лидер Немцов Б.Е.) и в г. Воронеже (лидер профессор-физик Кадменский). Лидеры этих движений, отнюдь не заботясь о социальных интересах горожан, не дав себе труда разобраться в специфике строящихся атомных котельных, не считаясь с высокой экспертной оценкой проекта АСТ-500 комиссией МАГАТЭ из числа ученых-специалистов разных стран и играя на эмоциях толпы, добились прекращения строительства атомных котельных, чем нанесли весьма большой финансовый и материальный ущерб, лишили на многие десятилетия свои города возможности иметь более чистую атмосферу, надежное теплоснабжение. А в качестве выигрышного результата для себя лично получили широкую известность как инициативные политики.

Необходимость воспитывать доверие к науке в России относится не только к широкой общественности, но и к верхнему эшелону власти. Мне вспоминается собрание директоров предприятий ВПК Нижегородского региона, которое проводилось под председательством заместителя председателя Правительства России. Я написал ему записку с вопросом: «Почему успешное восстановление разрушенной экономики после Второй мировой войны в Японии, Германии и других странах проводилось с опорой на науку, на ученых, а в России наука к восстановлению экономики не привлекается,

ее рекомендациями пренебрегают и обеспечивают ее финансовыми средствами по остаточному принципу? Это связано с какой-то новой разработанной Правительством концепцией, которой оно и придерживается?». Заместитель председателя не нашел ничего лучшего для ответа как сказать: «Надо подождать несколько лет, и мы будем лучше поддерживать науку». Из такого ответа однозначно следует, что вопроса заместитель председателя даже не понял. Науку надо не поддерживать, на науку власти следует опираться.

Исключение науки, ученых из числа наиболее эффективных средств при решении стратегических проблем развития общества, как, например, восстановление разрушенной экономики России после «перестройки», развитие атомной энергетики и др., совершенно недопустимо, поскольку неизбежно приведет к дезорганизации любой страны, которая будет придерживаться такой политики.

Поэтому должны быть найдены эффективные формы придания необходимого приоритета заключениям ученых при принятии решений, имеющих общественную значимость. Эти формы не должны допускать эмоциональных решений вопреки научно обоснованным заключениям. То, что атомная энергетика — потенциально опасная система, соответствует действительности. Это факт, который всеми, кто имеет отношение к ее созданию и эксплуатации, должен учитываться. Поэтому они должны использовать только такие технические и организационные решения, которые гарантированно исключают возможность проявления потенциальной опасности для населения и окружающей среды. Альтернативы такому подходу при широком использовании атомной энергетики нет. Вообще говоря, любой тип энергетики потенциально опасен, но масштабы опасности атомной энергетики и других известных типов энергопроизводства существенно различны. Поэтому и места, которые в проектах занимают и должны занимать системы безопасности, существенно различны для разных типов энерготехнологий.

С первых шагов развития атомной энергетики решению задач, направленных на предупреждение или исключение проявления потенциальной опасности излучения, отводилось центральное место при разработке проектов ЯЭУ и атомных станций в целом. При этом по мере развития атомной энергетики требования к безопасности только ужесточались.

После Чернобыльской катастрофы международным сообществом ученых и специалистов под руководством МАГАТЭ была проведена большая аналитическая работа по формулированию требований к безопасности, следование которым исключает недопустимое воздействие на окружающую среду. Эти требования в полной

мере нашли отражение в национальных законодательствах и нормативах. Рекомендации МАГАТЭ требуют, что если проектант реакторной установки не может доказать с достоверностью, что аварии с расплавлением активной зоны реактора не могут реализоваться при любых физически возможных исходных событиях, то он обязан рассмотреть такую аварию как постулируемое событие и доказать, что предусмотренные в проекте физические барьеры исключают недопустимое воздействие на окружающую среду и население. Важнейшее положение, которое вошло в требования по безопасности атомной энергетики, – это учет человеческого фактора как возможного источника действий, приводящих ядерный энергетический источник к аварийному состоянию. А известно, что в обеих наиболее масштабных авариях на АЭС «Три-Майл-Айленд» и Чернобыльской АЭС именно ошибочные действия персонала привели реакторы к аварийному состоянию и усугубили последствия аварийного процесса.

Сейчас имеются основания утверждать, что реализация требований, разработанных под эгидой МАГАТЭ, в любом проекте ЯЭУ позволяет гарантировать ее безопасность.

Такое состояние с проблемой безопасности особенно важно в настоящее время, когда наблюдается консолидация усилий различных стран по обоснованию и поиску новых проектных решений атомных станций в целях повышения их технико-экономических показателей, расширения форм и сфер использования атомной энергии, включая непосредственное использование тепловой энергии в промышленных производствах.

Перестройка и преодоление ее негативных последствий

Учитывая масштабность изменений, вызванных перестройкой, в жизни и деятельности ОКБМ, я считаю себя не вправе обойти молчанием эту тему, подводя итоги своей многолетней работы в ОКБМ.

С перестройкой жизнь ОКБМ во всех отношениях изменилась и качественно, и количественно. Под влиянием средств массовой информации, городских собраний и митингов, в коллективе началось брожение, возникали вопросы, на которые не было ответов. Например, кто теперь нами управляет, чем теперь будет заниматься предприятие, будет ли по-прежнему оплачивать наши работы ведомство, что такое рынок по отношению к ОКБМ, если социализма не будет, то что будет взамен; кем будут назначаться капиталисты и т. д. При всей этой неразберихе стали появляться предложения и организационного плана: об избрании руководителей ОКБМ, организации при директоре Совета из представителей подразделений с расширенными правами и др.

Пришлось подготовить совместно с профсоюзным комитетом расширенную конференцию, на которой нужно было обсудить и по возможности внести с какими-то оговорками ясность по наиболее животрепещущим вопросам, хотя было понятно, что это в принципе невозможно, поскольку в стране в целом была «жизнь во мгле». Но мне казалось, что сама попытка обсуждения этих вопросов будет полезной не только с точки зрения «выпуска пара», но была надежда, что кое-что прояснится по существу. Большая часть участников конференции должна была понять, что вопросы, которые поднимаются и волнуют людей, автономно предприятиями не решаются, тем более что и лидеры перестройки, по-видимому, четкого плана действий не имели и пока что ограничились только провозглашением освобождения от коммунистической идеологии, перехода к рыночной экономике вместо плановой и объявили своей главной задачей (устаами Е.Гайдара) «все разрушить».

С первых шагов перестройки руководством ОКБМ было принято решение продолжать работать согласно утвержденным рабочим планам, пока из ведомства не последует каких-либо указаний.

Такое решение я и сейчас считаю единственно правильным, поскольку оно способствовало сохранению некоторой стабильности предприятия и позволило избежать хаоса, последствия которого предвидеть было невозможно. Я надеялся в процессе конференции пояснить, что то, что происходит в СССР, имело место в истории других стран и происходило тогда, когда страна достигала такой стадии роста, при которой утвердившиеся организационные формы, способы разрешения жизненно важных проблем общества теряли свою эффективность и действенность. Это и приводило к переворотам, революциям со всеми вытекающими последствиями, как правило, тяжелыми для большей части населения страны.

На конференции я кратко охарактеризовал состояние предприятия, процессы, в нем происходящие, определил их как негативные, деградационные, исключил возможность разработки конкретных рабочих планов вывода предприятия из критического состояния из-за отсутствия каких-либо общероссийских руководящих указаний, распоряжений, нормативов, на которые можно было бы ориентироваться при разработке мероприятий для преодоления негативных явлений.

Я подчеркнул, что в настоящее время ОКБМ плывет в общем стремительном потоке событий, вызванных решением объявленной «главной задачи» всеобщего разрушения. Чем и когда это закончится, неизвестно, и никто из честных людей не пытается это определить. Из истории известно, что в каждой стране, пережившей события типа перестройки, последствия определялись политическими, экономическими и социальными особенностями страны.

И когда я на конференции попытался пояснить это примерами Великобритании, Франции (влияние захвата и ограбления колоний), Германии (контрибуция Франции), в зале прозвучали голоса: мол, нам это не надо, нам нужно как у нас. Мне пришлось отреагировать весьма определенно: «У России колоний не было и нет. Поэтому у нас капитализм может строиться только за счет затягивания потуже ремней на штанах большинства нашего народа. Без этого в России богачей не создать, а капитализма без богачей не бывает».

На этом и закончилась моя попытка довести до сведения представителей интеллектуального коллектива ОКБМ свои представления о перестройке на начальном этапе ее становления. Думаю, что меня тогда совсем не поняли, но в дальнейшем о моих словах вспоминали.

После этого конференция перешла к конкретным вопросам, наиболее важными из которых представлялся вопрос о создании

при директоре выборного Рабочего совета представителей коллектива. Многие из участников ожидали, что директор будет возражать. Однако я заявил, что у меня нет возражений. Но я буду настаивать, чтобы Рабочий совет, который будет избран, в первую очередь согласовал с профсоюзным комитетом перечень вопросов, которыми он будет заниматься. Без такого разделения мне придется дублировать обсуждение вопросов и с профсоюзным комитетом, и с Рабочим советом, что, конечно, недопустимо.

Практика довольно скоро показала нежизненность Рабочего совета, поскольку все его предложения сводились в той или иной форме к улучшению материального положения коллектива, а по поводу того, как увеличить поступления финансовых средств даже за выполненные ОКБМ работы, никаких реальных идей не рождалось. Поэтому Совет самораспустился. Однако он в какой-то мере все-таки сыграл положительную роль, поскольку я почувствовал при рабочих контактах с сотрудниками возросшее доверие к руководству предприятия.

Видимо, значительная часть участников конференции в процессе дискуссии убедились, что руководство предприятия использует все доступные возможности для обеспечения финансовыми средствами работ предприятия, поступления оплат за выполненные работы в любых приемлемых формах (например, бартер, векселя и др.), установление порядка выполнения небольших по объему работ по отдельным договорам силами инициативных бригад сотрудников и др. Однако этих возможностей было явно недостаточно для кардинального решения проблем, возникших при установившемся новом порядке (точнее, беспорядке), которые требовали принципиальных решений со стороны новых властных структур.

После дискуссии на конференции, где пришлось выслушать массу недоуменных вопросов, на которые у меня не было ответа, почувствовать глубину переживаний людей в связи с происходящими событиями в стране, проявлениями неуверенности каждого в своем будущем, у меня появилось стремление привести в систему свои реакции, взгляды на происходящее, попытаться спрогнозировать развитие перестройки хотя бы на ближайшее будущее.

Вначале я постарался уяснить возможное место ОКБМ в новых условиях, когда заказов по профилирующей тематике в ближайшие годы не предвидится. Особенность ОКБМ как предприятия заключается в том, что оно в своем составе имеет высококвалифицированный коллектив конструкторов, теоретиков, технологов; экспериментальную и испытательную базу, обеспечивающую весь объем испытаний, необходимый для разработки проектов судовых реакторных установок; производственную базу нескольких машиностроительных цехов,

которые обеспечивают изготовление всего оборудования, входящего в состав реакторных установок. Поэтому у меня не было сомнений, что ОКБМ может выполнять весь необходимый объем работ по созданию машиностроительного оборудования для других отраслей. Дальнейший опыт работы ОКБМ в полной мере подтвердил мою уверенность.

Для предприятий Военно-промышленного комплекса Советского Союза характерно наличие значительного числа научно-производственных комплексов типа ОКБМ. Именно в них рождались новые технические идеи и в них реализовывались и в проектах, и в металле технические системы определенного назначения. У меня сложилось убеждение, что именно такие предприятия – научно-производственные центры – могут стать теми активными центрами возрождения промышленности, когда страна осознает, что нельзя ограничиваться только разрушением созданного до перестройки, что-то надо и создавать.

Вот эти соображения я и изложил в своем выступлении на слушаниях в Государственной Думе 23 марта 1998 г. на тему: «Научно-технические и организационные проблемы машиностроительного комплекса на современном этапе», которое приводится ниже.

Машиностроение – индикатор экономики

Трудно переоценить значимость обсуждаемой проблемы для промышленности и экономики в целом и для ее будущего. Состояние машиностроения – надежный индикатор состояния экономики страны, поскольку именно машиностроение определяет уровень технической культуры, научно-производственный потенциал, стабильность и прогресс экономических процессов в стране. Без развитого машиностроения ни одна страна не может претендовать на лидирующую роль в мировой экономике.

Поэтому тот факт, что в последние годы отечественное машиностроение не только не развивается, а постепенно и недопустимо быстро деградирует, расходуя не лучшим образом остатки научно-технического задела доперестроечных лет, должен послужить поводом для всестороннего изучения проблемы и принятия экстренных мер для ее положительного решения.

Имеются веские основания считать, что без научно обоснованной организации решения проблемы отечественного машиностроения невозможна разработка реальной программы восстановления и развития экономики страны.

Я позволю себе высказать в этом плане некоторые соображения и предложения, опираясь на многолетний опыт работы ОКБМ, которое я здесь представляю.

Считаю, что опыт ОКБМ типичен для большинства такого рода предприятий, которые в доперестроечный период в значительной степени определяли развитие машиностроительной культуры в нашей стране. Поэтому информация о состоянии этих предприятий, трудностях, с которыми они встречаются в своих попытках эффективного использования в новых условиях имеющихся научно-технических и производственных возможностей, является одним из необходимых условий для делового решения задачи восстановления отечественного машиностроения.

Опытное конструкторское бюро машиностроения (ОКБМ) Министерства Российской Федерации по атомной энергии до перестройки занималось созданием различного оборудования и установок для атомной отрасли, в частности, атомных энергоустановок для подводных и надводных кораблей ВМФ, атомных ледоколов и др.

ОКБМ располагает высококвалифицированными коллективами конструкторов, исследователей, экспериментаторов и испытателей. В составе предприятия находится комплекс исследовательских и испытательных лабораторий, производственная база в составе нескольких машиностроительных цехов. При ОКБМ организован Центр по сертификации широкой номенклатуры оборудования в целях проведения сертификационных испытаний.

С началом перестройки и уменьшением оборонных заказов в ОКБМ высвободились кадровые и производственные ресурсы для работ в интересах гражданской экономики, не связанных с атомной тематикой.

Ознакомление с потребностями ряда производств и отраслей позволило специалистам ОКБМ прийти к заключению, что опыт, квалификация и производственные возможности ОКБМ по созданию специального оборудования атомной энергетики и его изготовлению могут найти широкое применение и эффективное использование на предприятиях многих отраслей, и в первую очередь в топливно-энергетическом комплексе (ТЭК), химической промышленности и нефтехимических производствах. Как известно, многие химические и нефтеперерабатывающие предприятия относятся к числу потенциально опасных. Поэтому для них немаловажным является то, что специалистам ОКБМ свойственна высокая культура безопасности, сложившаяся в процессе многолетней работы по атомной тематике.

К настоящему времени ОКБМ создало и поставило ряду предприятий ТЭК разнообразное оборудование, в том числе уникальные герметичные насосы, арматуру высокого давления, вибрационный комплекс для нефтегазоразведки и вибрационного воздействия на пласт с целью увеличения нефтеотдачи, термопреобразователи и др.

Разработаны проекты теплообменного оборудования, которые учитывают особенности технологии производств ТЭК и нефтехимических предприятий, в частности:

- проект котла-утилизатора для охлаждения реакционного пирогаза печи, пиролиза дихлорэтана, производства винилхлорида;
- проект регенератора газотурбинных установок для магистральных трубопроводов на основе унифицированных модулей, что обеспечивает возможность поставки оборудования на монтажную площадку отдельными блоками и сокращение объема монтажных работ;
- проект теплообменника газ (C_2H_6) – вода на унифицированной элементной базе для нефтепереработки.

ОКБМ определено приказом Минатома России Головной организацией по разработке проектов скважинной запорно-регулирующей трубопроводной арматуры в рамках Комплексной программы «Средства автоматизации технологических процессов для ТЭК РФ».

Для предприятий других отраслей создано и поставлено разнообразное оборудование 17 видов, в том числе различные типы насосов для молокоперерабатывающих предприятий, установка для тонирования стекла, установка молекулярной дистилляции, дозаторная установка для микробиологического производства и др.

Результаты эксплуатации оборудования разработки ОКБМ свидетельствуют, что оно по своим характеристикам не только не уступает импортному, но в большинстве случаев превосходит его, и в первую очередь – по ресурсным характеристикам, надежности, простоте обслуживания.

Большое разнообразие оборудования, созданного в ОКБМ для предприятий различных отраслей, хорошие эксплуатационные характеристики свидетельствуют о высокой квалификации специалистов и больших потенциальных возможностях этого предприятия не только для атомной энергетики, но и для многих других отраслей, нуждающихся в высоконадежном машиностроительном оборудовании различных видов.

Для предприятий-пользователей продукции ОКБМ весьма значимым является и то, что ОКБМ обеспечивает авторское сопровождение в процессе эксплуатации и сервисное обслуживание, поскольку мы перенесли и на эту часть оборудования сложившуюся у нас многолетнюю практику работы по атомной тематике. Такое решение позволяет оперативно выявлять «узкие места» в конструкциях и принимать оперативные меры для их преодоления, что обеспечивает эволюционное совершенствование техники.

Следует к этому добавить, что ОКБМ имеет в своем составе специальную службу для диагностического контроля, оснащенную

необходимыми техническими средствами, которая распространяет свою деятельность на предприятия, использующие оборудование разработки ОКБМ, что необходимо для своевременного определения ресурсных возможностей оборудования в процессе эксплуатации.

Полученный к настоящему времени опыт, несмотря на значительные потери кадрового состава за годы перестройки, позволяет нам считать, что ОКБМ имеет возможность удовлетворить значительную часть потребностей, в первую очередь нефтеперерабатывающих и химических производств, в оборудовании с учетом особенностей их технологий.

Однако широкому использованию производственных возможностей ОКБМ препятствуют неплатежеспособность большинства заинтересованных в нашей продукции предприятий и так называемые «связанные» зарубежные кредиты, на которые почему-то легко идут руководители соответствующих отраслей и предприятий.

Кроме того, с каждым годом становится все более острой проблема себестоимости нашей продукции. Чрезмерно высокая стоимость конструкционных материалов, электрической и тепловой энергии и др. чрезвычайно затрудняет обеспечение конкурентоспособной цены создаваемого в ОКБМ оборудования. В решении этой задачи весьма важную роль играют также масштабы производства. Если заказ предусматривает единичное изготовление, то исключается возможность оптимальной технологической подготовки, поскольку все затраты на нее войдут в стоимость этого заказа. При достаточной серийности производства эта трудность исключается, поскольку затраты на техническую подготовку распределяются на всю серию.

Неопределенность с заказами, отсутствие на предприятии достаточных оборотных средств вынуждают экономить на подготовке производства, что, как правило, приводит к существенному повышению себестоимости.

Отмеченные факторы характерны и для большинства предприятий других отраслей, и для экономики страны в целом. Поэтому проблему восстановления и развития отечественного машиностроения нельзя рассматривать в отрыве от общей экономической политики.

Действительно, нельзя думать, что какое-то частное решение, например, обеспечение каких-то надежно оплачиваемых заказов для отдельных предприятий машиностроительного комплекса, может гарантировать «пробуждение» и развитие в условиях «статус-кво» для других предприятий и отрасли в целом.

Несомненно, что наша промышленность нуждается в научно обоснованной программе, которая учитывала бы все реалии экономики страны, определяла бы, с чего начать с учетом располагаемых средств, а также предусматривала необходимость государственного регулирования.

Учитывая особо важную роль, которую играет нефтегазовый комплекс в экономике нашей страны, нельзя исключать, что грамотный системный анализ может привести экономистов, специалистов-системщиков к заключению, что именно та часть машиностроительного комплекса, которая обслуживает или может обслуживать ТЭК, и является тем звеном, за которое необходимо тянуть в первую очередь.

Отсутствие перспективной программы восстановления отечественного машиностроения, безусловно, является одним из основных факторов, сдерживающих инициативу и какие-либо попытки на местах в отношении изменения к лучшему положения на машиностроительных предприятиях.

Вызывает удивление, что очевидная недопустимость сложившейся ситуации до сей поры не вызвала острой реакции со стороны специалистов, экономистов, заинтересованной общественности.

В порядке заключения можно отметить следующее:

1. На примере ОКБМ и подобных ему научно-производственных предприятий можно считать, что страна пока еще располагает некоторым научно-производственным потенциалом, который позволит при соответствующих условиях обеспечить стабилизацию и прогрессивное развитие необходимых отраслей машиностроения с учетом требований конкурентоспособности на мировом рынке.

2. Для эффективного задействования этого потенциала необходима разработка, а не заимствование с Запада научно обоснованной экономической политики, которая бы учитывала особенности страны, состояние отраслей промышленности, наличие реальных источников финансирования и обеспечивала бы защиту интересов отечественных машиностроительных предприятий.

Необходимость перестройки

Экономика СССР за время своего относительно недолгого становления и развития прошла сложный и весьма неоднозначный путь.

При рассмотрении пройденного пути четко различаются следующие этапы:

- восстановление разрушенной экономики после многолетней гражданской войны, которое закончилось нэпом;
- плановая индустриализация страны;
- экономика периода Великой Отечественной войны;
- послевоенная экономика — период «холодной» войны;
- стагнация экономики СССР — застой.

Анализируя экономику СССР на всех этапах, следует рассматривать порознь отрасли промышленности и сельское хозяйство. И это

несмотря на их естественную взаимосвязь. Дело в том, что руководство страны видело в рабочих гегемона революции, носителя всего прогрессивного, защитника социалистических идеалов. В крестьянстве, напротив, оно видело источник, опасность возрождения старых традиций, общинных тенденций, которые при определенных условиях могли противостоять партийным установкам.

Кроме того, руководство страны видело в деревне единственный реальный источник средств для проведения индустриализации. Поэтому стране и пришлось пережить революционную ситуацию: стремительное развитие индустриализации при одновременном не менее стремительном развале деревни, социальном обнищании крестьянства, растущей его бесправности и незащитности.

Промышленность после нэпа развивалась целеустремленно, наращивались темпы, выделялись приоритетные объекты, и результативность развития была очевидной. Этому весьма способствовало становление и развитие научной базы, реализация всеобщего образования.

Сельское хозяйство, напротив, начиная с продразверстки и коллективизации испытывало и испытывает на себе до сей поры результаты многочисленных ограничений, а затем вариантов модернизации, но так и не стало надежной и достаточной базой продовольственного обеспечения СССР, а сейчас и России. Одной из основных причин плохой продуктивности нашего сельского хозяйства является, по-видимому, то, что в процессе коллективизации деревня была «обескровлена», из нее были изъяты наиболее опытные потомственные умельцы-земледельцы и их семьи, носители знаний, опыта, традиций обращения с землей. На их место пришли люди другого типа, которые, став официальными лидерами, заботились в первую очередь о формальных цифрах, показателях, а не о реальной продуктивности.

В результате деревня утратила чувство земли, любовь к ней, а значимость этого фактора в сельском хозяйстве гораздо больше, чем любовь рабочего к родному заводу и его деятельности. Поэтому и после снятия ограничений и попыток плановой модернизации (хотя и по остаточному принципу) сельского хозяйства существенных положительных результатов по продуктивности в этой отрасли достигнуто не было.

Роль плана в процессе индустриализации СССР была чрезвычайно велика. Планирование имело определяющий характер, поскольку вокруг этих планов всеми средствами информации создавалась атмосфера «особости», чрезвычайной важности, перспективности. В представлении широких масс росло чувство патриотизма, гордость за страну, зрела уверенность, что страна движется к светлому будущему, и оно не за горами. Повышенная требовательность, предъявляемая

к руководителям, отвечающим за выполнение соответствующих позиций плана, воспитывала повышенное чувство ответственности у исполнителей всех рангов, и естественный кадровый отбор на первые роли выдвигал, как правило, людей талантливых, инициативных, потенциальные возможности которых раскрывались в процессе работы.

Нельзя также забывать о роли партийных организаций и их руководителей на местах, поскольку они несли ответственность за выполнение плановых позиций по партийной линии наряду с руководителями предприятий, строек. Поэтому при сравнительном анализе плановой и рыночной экономики с использованием опыта СССР необходимо учитывать, что в СССР вокруг определяющих позиций плана (особенно в период индустриализации) партийное руководство, используя все средства информации и агитации, умело превращать реализацию плановых задач в общенародное дело страны, региона, города в зависимости от масштабности позиций плана. При рыночной экономике такой фактор обеспечить невозможно. На мой взгляд, в большинстве случаев не удавалось его обеспечивать и в сельском хозяйстве, хотя и были исключения. Например, поднятие целинных земель в Казахстане и Оренбургской области было бы практически невозможно без превращения этого мероприятия в общенародное дело.

Из опыта индустриализации СССР при объективном подходе нельзя не прийти к заключению, что без плановой экономики и соответствующего руководства страной нельзя было бы выполнить того грандиозного объема работ, который действительно превратил в короткие сроки нашу страну в промышленную державу с развитыми наукой, образованием, технической культурой. К сожалению, эти достижения, признанные и мировой общественностью, сопровождались недопустимыми массовыми репрессиями по отношению к так называемым «врагам народа», нарушением общепринятых нравственных норм, законов собственности и т.д., которые не могут иметь оправдания. Однако и при этих условиях нельзя пренебрегать той частью положительного опыта плановой экономики, которая может быть эффективно использована в современных условиях для вывода страны из кризисного состояния.

Спрашивается, почему Советский Союз, имея сложившуюся структуру управления, подтвердившую свою эффективность при решении целого ряда жизненно важных для страны проблем (индустриализация, всеобщее образование, развитие науки, межнациональные отношения, победа в Великой Отечественной войне и др.), не смог продолжить свое существование и развалился как глиняный колосс при полном безветрии. Я понимаю, что ответ на этот вопрос будет делом не одного поколения исследователей.

Особенно острую реакцию вызывал дефицит продуктов питания, их плохое качество, постоянные очереди и злоупотребления, связанные с этим, — все это весьма болезненно воспринималось населением, интерпретировалось как нежелание и неумение властей организовать решение этой проблемы и порождало недовольство.

Состояние промышленности и экономики страны позволяло большую часть недостатков в ширпотребе ликвидировать, но здесь, по-видимому, сказывалась оторванность от народа верхушки партийной и государственной бюрократии, непонимание меняющейся обстановки. Весь период становления и существования Советского Союза отличался чрезвычайностью, «авральностью» возникавших проблем, которые для своего решения требовали условий и методов, наиболее просто реализуемых при жестком централизованном управлении. Распространение этих же методов на решение повседневных рядовых задач на всех уровнях вызывало у большинства людей непонимание и раздражение. Хроническая недостача товаров широкого потребления с годами начала вызывать у населения протест, поскольку во многих случаях видимых причин для этого не было. А это могло быть результатом того, что в Госплане кто-то чего-то не предусмотрел, пропустил без видимых причин.

Но я хотел попытаться понять, необходима ли в этих условиях была перестройка, или же она относится к категории тех исторических случайностей, которых можно было избежать. Если перестройка — необходимость, то какие цели она должна была преследовать? Неужели только все разрушать, что было создано в доперестроечный период? Это было бы слишком неумно. Перестройку однозначно связывают с рыночной экономикой. Интересен был бы ответ на вопрос: если она как средство воздействия на развитие общества имеет положительные проявления, может ли она совмещаться при каких-то условиях с планированием экономики? Для этого вначале необходимо выделить те факторы, которые заведомо способствовали развалу Советского Союза.

С годами происходила смена поколений в партийной и государственной вертикалях, когда новые чиновники быстро усваивали внешнюю форму своих функций, но отнюдь не содержание, которое вкладывали в них предшественники, руководствовавшиеся своими революционными идеалами. Это естественный процесс привыкания, старения, который переживает любая организационная система. В нормальной обстановке, лишенной необходимости чрезвычайных усилий по организации работ, жестко централизованное управление проигрывает рыночной экономике, что в первую очередь проявляется на товарах широкого потребления.

Действительно, рыночная экономика имеет и свои преимущества, которые обусловлены рядом почти очевидных причин. Например, собственник предприятия-изготовителя товарной продукции непосредственно заинтересован в росте ее количества, качества и реализуемости в торговой сети, поскольку это непосредственно приводит к росту его дохода.

При плановой экономике руководство предприятия-изготовителя преследует цель выполнить во что бы то ни стало плановое задание, поставить выпущенную продукцию в плановый срок торговой организации. Именно по этим показателям власти и судят о работе предприятия-изготовителя. Вопросы реализации в торговой сети продукции его могут не интересовать.

Отмеченные различия определяют существенно разную реакцию в случае уменьшения спроса на продукцию в условиях рыночной и плановой экономики. В первом случае собственник предприятия срочно разбирается в причинах уменьшения спроса и принимает необходимые меры: либо улучшает потребительские качества своей продукции, либо снижает цену, либо ставит на производство другую продукцию, более выгодную для него по уровню доходности.

При плановой экономике предприятие-изготовитель еще долго будет иметь плановое задание на изготовление уже не пользующейся спросом продукции, интенсивно затоваривая рынок, потому что реакция плановых органов на состояние рынка последует только после длительного прохождения информации о происшедшем на рынке по длинной бюрократической цепочке. Финансовые последствия очевидны. Собственник предприятия-изготовителя заинтересован в достаточно быстром обновлении выпускаемой продукции, поскольку это способствует росту его доходов и в значительной степени страхует от конкурентов. В условиях плановой экономики обновление продукции предприятия-изготовителя происходит только по указанию «сверху».

Из рассмотрения приведенных примеров видно, что собственник предприятия-изготовителя в условиях рыночной экономики непосредственно сам реагирует на изменившиеся условия рынка и вносит изменения в производственный процесс, стремясь сохранить доходность предприятия. Это очень важный фактор, аналог которому в технике известен под названием «саморегулирование». В технике из двух систем управления, отличающихся наличием саморегулирования или его отсутствием при прочих равных показателях, всегда отдают предпочтение системам с саморегулированием. Саморегулирование реализуется, если в объекте управления имеются так называемые обратные связи с отрицательным знаком, за счет которых и обеспечивается

нейтрализация фактора, приведшего к изменению заданного рабочего процесса. Для каждого объекта с отрицательными обратными связями существует диапазон оптимальных их значений, отклонение от которого либо нежелательно, либо недопустимо по причине изменений в поведении объекта управления.

С учетом этих различий и следует искать ответ на вопрос о предпочтительности рыночной или плановой экономики. При этом, если объектом управления является экономическая система, то при переходе от плановой экономики (то есть без саморегулирования) к системе с рыночной экономикой (с саморегулированием) важно не только подобрать оптимальные значения обратных связей, но и выбрать время перехода на саморегулирование из условия сведения к минимуму возможных негативных последствий в переходный период. Такой подход, по-видимому, заведомо исключает допустимость одновременного перехода на рыночную экономику во всех отраслях хозяйства страны. Ранее я уже высказал свое убеждение, что индустриализация СССР в тех масштабах и сроках, как это было сделано, была бы заведомо неосуществимой при рыночной экономике в стране.

В еще большей степени это утверждение относится к периоду Великой Отечественной войны, когда организация работы промышленности в интересах фронта была жизненно важной для страны и была настолько сложной, жестко целеустремленной, что ее решение без надежной централизации управления, базирующегося на стратегическом и оперативном планировании, даже не могло и обсуждаться.

Таким образом, из приведенных примеров следует, что общей рекомендации на все случаи жизни о предпочтительности той или иной экономики не может быть.

Несколько замечаний о возможном совмещении положительных качеств плановой и рыночной экономики. В экономической литературе, особенно отечественной, уже давно стало модным рассматривать плановую и рыночную экономику как антиподы. При этом исследователи не придавали значения тому, что и в западных странах, и в Японии находились ученые-специалисты, которые достаточно глубоко изучали многолетний опыт плановой экономики в СССР и извлекали для себя соответствующие уроки для решения своих экономических и социальных проблем.

К настоящему времени имеется положительный опыт использования рыночных факторов в централизованной плановой экономике КНР, где, как известно, и в теории, и на практике придерживаются социалистических идеалов и догматов. Достаточно оптимальное сочетание социалистических принципов собственности и рыночных стимулов при организации деятельности предприятий позволили

КНР обеспечить стремительное развитие экономики, промышленности, сельского хозяйства и социальной сферы и выйти на второе место в мире (после США) по валовому внутреннему продукту. Поэтому есть основания положительно ответить на вопрос о принципиальной возможности (по крайней мере, на переходном этапе) совмещения положительных факторов, присущих плановой и рыночной экономике, в целях более эффективного развития страны. При этом конкретная форма совмещения должна вырабатываться в каждом случае с учетом особенностей экономического и социального состояния страны, определяющих целей, которые ставятся на данном этапе развития, и действующих внешних факторов, что при определенных условиях может повысить экономическую эффективность соответствующих предприятий за счет эффекта саморегулирования. При этом доля рыночных факторов в различных предприятиях будет зависеть от специфики предприятия и общего развития переходного этапа в стране в целом.

Изложенные выше соображения позволяют думать, что в принципе отказ от жестко централизованной плановой экономики оправдан, а постепенное подключение рыночных факторов к плановой экономике возможно, что позволит повышать ее эффективность в переходный период.

Однако такая экономическая политика требует тщательного анализа, а рабочая программа включения (когда и где) элементов рыночной экономики должна исключать негативные последствия (даже временные). При этом нужно учитывать, что рыночная экономика не может рассматриваться как некая политическая платформа, программа, реализация которой определяет дальнейшее развитие общества к «светлому будущему».

Рыночная экономика — это только одно из возможных и необходимых средств решения социальных преобразований на определенном этапе развития, причем время обращения к этому средству не является произвольным. Оно определяется многими внутренними особенностями состояния общества и действующими внешними факторами. В одних условиях переход к рыночной экономике может оказаться нецелесообразным и даже вредным, при других — эффективным при каких-то ограничениях или требует предварительной реализации понятных и достижимых условий, то есть нужно не забывать, что рыночная экономика не панацея от всех зол, а только средство, которое может оказаться весьма действенным при определенных условиях и не более.

Я не склонен считать, что полный перевод всей экономики страны на рыночные основы есть тот идеал, к которому должна стремиться каждая страна, и это не породит каких-то негативных последствий, совершенно недопустимых для общества.

Для обоснованного решения этой проблемы, безусловно, требуются глубокие системные исследования с учетом не только экономических факторов, но и социальных, психологических. Для этого необходимо определить, какое общество должно быть построено в конечном итоге, поскольку его особенности и критерии будут в значительной степени определять используемые средства развития экономики, социальной сферы и в целом траекторию изменения общества во времени.

Учитывая принципиальную важность этого утверждения, считаю целесообразным рассмотреть следующую аналогию.

В технике за последние несколько десятилетий достигнуты весьма значительные результаты в исследовании сложных систем в целях изучения их поведения при проектных условиях эксплуатации, при значительных отклонениях эксплуатационных параметров и при аварийных состояниях. Эти исследования позволяют определить необходимые воздействия на систему для поддержания проектных режимов работы, предупредить возникновение аварийных состояний и их недопустимое развитие. В совокупности эти исследования позволяют создать так называемую систему управления, регулирования и защиты, которая и обеспечивает функционирование или достижение и поддержание заданного состояния технической системы с исключением рискованных ситуаций.

В основе создания сложных технических систем лежит системный анализ. Объектом изучения может быть в принципе любая создаваемая или существующая система, в том числе и нетехническая. При исследовании поведения любой системы должны быть корректно учтены исходные (начальные) условия, воздействующие внешние факторы и возможные со временем внутренние изменения в самой системе.

Простейшим примером такой системы может быть материальная точка, состояние которой характеризуется массой, положением в пространстве (X, Y, Z) , значением и направлением скорости в начальный момент времени t . При отсутствии внешних воздействий положение материальной точки в фазовом пространстве (X, Y, Z, t) будет изменяться со временем равномерно строго по прямой линии. Если потребуется переместить материальную точку в какую-то заданную точку фазового пространства, то потребуется определить характер и время воздействия на нее с учетом значения и направления текущей скорости в момент времени воздействия. Очевидно, что при различных начальных условиях траектории перемещения тела будут также различны и, как следствие, для перемещения тела в заданную точку пространства потребуются различные внешние воздействия.

Решение такой задачи в рамках теоретической механики не представляет трудностей. В принципе такой подход используется и при исследовании поведения сложных систем. Но при этом фазовое пространство, в котором интерпретируется поведение системы, определяется числом параметров, характеризующих состояние системы в изучаемый период времени. Поэтому это фазовое пространство может быть многомерным в зависимости от сложности системы. Очевидно, что в качестве параметров при этом выступают не только пространственные координаты, но и любые другие величины, которые характеризуют состояние системы, процессы, в ней происходящие, и ее поведение в целом.

По существу, весь методологический опыт, накопленный и проверенный при создании сложных технических систем, может быть использован и при исследовании систем из других (нетехнических) сфер, в частности, систем социальных, экономических, демографических и др. К настоящему времени российскими учеными уже выполнено достаточно много таких исследований. Большая часть их принадлежит ученым, которые участвовали непосредственно в создании сложнейших технических систем в СССР и заслуженно получили признание и в нашей стране, и в мире.

Основная сложность при исследовании нетехнических систем обусловлена выбором и обоснованием параметров, определяющих поведение системы, заданием исходного ее состояния, граничных условий и определением конечного состояния, в которое система должна быть переведена за заданный интервал времени. Для этого предполагается обоснование необходимых внешних направляющих воздействий, без которых достижение заданного конечного состояния практически невозможно.

На примере задания начального состояния системы при исследовании социальных проблем страны можно уяснить возникающие сложности, которые могут иметь принципиальный характер. Например, хорошо известна вековая дискуссия между западниками и славянофилами, которая продолжается и поныне, о выборе пути развития России. Западники однозначно рекомендуют использовать исторический опыт западных стран Европы, накопленный ими при переходе от феодального строя к капиталистическому. Однако, если ориентироваться на схему системного исследования, о которой говорилось выше, то необходимо убедиться, что в начальных условиях у России и западных стран нет существенных отличий. Но в действительности это не так. Западные страны Европы складывались на развалинах греко-римской культуры, унаследовали в большей степени ее достижения в различных областях знания, искусства, техники, ремесла и

следовали в какой-то степени установившимся традициям. Конечно, все это каждым народом адаптировалось с учетом своих национальных особенностей. Но факт заимствования части наследия греко-римской культуры у всех западных стран, несомненно, имел место, и последствия этого в историческом развитии этих стран весьма существенны. Прямым отражением этого является тот факт, что в течение многих столетий элитные части общества этих стран общались между собой посредством одного языка — латинского, происхождение которого однозначно ведет к Риму.

В отличие от западных стран, Россия примерно в эти же годы переживала нашествие полудиких орд с Востока, последнее из которых (монгольское) на 300 лет лишило Россию самостоятельности, отбросило ее в культурном и научно-техническом отношении далеко назад со всеми вытекающими последствиями. Поэтому рассматривать возможность прямого заимствования западного пути становления капиталистического общества и развития ни сто лет назад, ни сейчас в принципе недопустимо. Формально при системном исследовании это выразится в том, что в пространстве определяющих параметров начальные точки и траектории изменения состояний России и западных стран будут существенно различны. Поэтому для того, чтобы они пришли в конце концов в одну и ту же точку (конечное состояние — капиталистическое общество), если это и возможно, то только при существенно различающихся внешних управляющих воздействиях, то есть тот путь, которым западные страны пришли к капитализму, не является универсальным и не может непосредственно заимствоваться Россией. Строго говоря, и пути западных стран к капиталистическому обществу были далеко не одинаковы.

Поэтому, когда вспоминаешь, как лидеры в самом начале перестройки вещали миру такие «истины», как-то: «субъекты федерации могут брать себе суверенитета столько, сколько «проглотят»; наша задача все разрушить, а дальше все само образуется»; то не перестаешь удивляться, что общество, воспитанное на уважении к науке, имеющее в своем составе представительную прослойку интеллигенции, зарекомендовавшую себя большими достижениями в науке, технике, культуре, столь безучастно, инертно следовало за лидерами, лишенными элементарных знаний, представлений об истории развития общества, государств.

Впрочем, сетовать по этому поводу сейчас бесполезно. Это свершившийся факт и относится он уже к истории. Необходимо искать выход из той пропасти, в которую страну столкнули лидеры перестройки.

За что я ратую?

Я убежден, что без научного подхода к поиску выхода адекватного решения не найти, то есть во главе решения судьбоносной проблемы для страны должны быть ученые, причем отечественные. Государственные советники-представители других стран не скрывают, что они не заинтересованы в том, чтобы Россия поднялась с колен. Их больше устраивает, чтобы Россия оставалась поставщиком сырья. Поэтому в восстановлении таких отраслей экономики как машиностроение, энергетика, сельское хозяйство, транспорт, страна должна рассчитывать на собственные силы и возможности.

Чем располагает страна для возрождения экономики? Можно надеяться, что на ближайшие 10 лет страна будет еще располагать необходимым научно-техническим потенциалом, включая и кадровый состав: ученых, инженеров, специалистов. Имеется некоторое число работоспособных научно-производственных центров в атомной, авиационной, космической и др. отраслях, в которых сочетаются научные и производственные возможности создания машин и оборудования, разработки и внедрения новых технологий, которые позволяют создавать машины, отвечающие новейшим требованиям, конкурентоспособные на международном рынке. Но этому должен предшествовать запуск в действие простаивающих промышленных предприятий, которые не способны без модернизации освоить серийный выпуск новейших машин. А модернизация требует больших вложений финансовых средств и времени.

Казалось бы, порочный круг! Но из него есть, на мой взгляд, выход. Для этого необходимо сориентировать промышленность на выпуск продукции, необходимой для внутреннего рынка, организовав при этом заслон для аналогичной импортной продукции. По мере восстановления работы предприятий на этих условиях за счет внутренних накоплений, в дальнейшем модернизировать по частям предприятия отраслей из условия производства новой конкурентоспособной продукции, которая должна создаваться в научно-производственных центрах на плановой основе. Конечно, реализация такой схемы предполагает разработку научно обоснованных рабочих программ.

Но и такой подход требует инноваций, финансовых средств. А государство средств не имеет. Оно держит свою армию на голодном пайке (голодные солдаты, устаревшее оружие), не обеспечивает решения минимально необходимых социальных нужд (нищета значительной части населения, бедное образование, здравоохранение, жилищно-коммунальное хозяйство и др.).

Это обусловлено тем, что почти все источники поступления финансовых средств, даже природная рента, розданы небольшой кучке богачей, которые свои доходы стараются быстрее переправить за рубеж и

не заинтересованы в каком-либо восстановлении, модернизации отечественных предприятий и возрождении экономики, достойной статуса России.

В этих условиях руководству страны придется либо существенно исправлять сложившееся положение с источниками поступления финансовых средств в казну страны, либо смириться с гибелью России как суверенной страны, поскольку даже такое жалкое существование, которое она имеет сейчас, не может длиться сколь угодно долго, так как нефтяная и газовая трубы либо иссякнут естественным образом, либо окажутся в зарубежной собственности, как уже случилось с некоторыми нефтяными скважинами на Сахалине, от которых страна не только не получает никаких доходов, но даже стала должником.

Необходимо в полной мере учитывать, что возрождение такой страны как Россия требует колоссальных усилий по организации работ, мобилизации населения страны, располагаемых средств и др.

Из опыта СССР известно, что при соответствующей организации на всех уровнях в стране удавалось решать сложнейшие проблемы, и полученные при этом результаты порой изумляли мир. Сейчас страна переживает кризисную ситуацию, но никаких идей, программных документов о путях и средствах преодоления кризиса, которых придерживается руководство страны, широкой общественности не известно. Есть ли они? Без этого консолидация народа невозможна, а без консолидации невозможно и возрождение.

**Доклады, статьи, речи,
выступления**

Перспективы развития атомной энергетики

Атомная энергетика и ее роль в развитии общества¹

1. Введение

Известно, что история человеческого общества начинается с первого костра, который сумел разжечь человек. Вся последующую историю человечества можно было бы изложить как историю развития его энерговооруженности. И в будущем проблемы энергетического обеспечения, безусловно, будут оставаться в ряду факторов, определяющих развитие. XX столетие войдет в историю как век грандиозного прорыва в решении энергетической проблемы. Человек сумел добраться до атомных энергетических кладовых и поставил их на службу обществу.

При этом нельзя не отметить стремительность развития событий на этом пути. В начале века открытие планетарной модели атома Э. Резерфордом и почти одновременно (1908 г.) его категорическое утверждение, что человек никогда не сумеет использовать внутриатомную энергию.

Но уже в 1942 г. в Чикаго Э.Ферми осуществил самоподдерживающуюся цепную реакцию деления ядер урана, а в 1945 г. на города Японии (Хиросима и Нагасаки) были сброшены атомные бомбы. К концу XX столетия завершился начальный этап становления атомной энергетики. Сейчас более 17 % электроэнергии на Земле производится на атомных станциях.

Конечно, можно и нужно сожалеть, что о своем рождении атомная энергетика заявила ужасной гибелью многих тысяч неповинных людей. Но это событие следует рассматривать и как знак-предупреждение: «Помните, люди, какую силу вы пробудили!».

¹ Тезисы сообщения на конференции в НГТУ, 2002 г.

2. Нужна ли человечеству атомная энергетика?

При ответе на этот принципиальный вопрос необходимо учитывать следующие соображения:

- энергия для человека нужна в такой же степени, как воздух и пища, но в отличие от последних в возрастающих масштабах расхода на человека по мере роста уровня жизни, духовных и материальных запросов;
- рост численности населения планеты определяет стремительный рост энергопотребления;
- энергопроизводство за счет возобновляемых источников не может обеспечить минимально необходимого энергопотребления на длительное время (ветровые и гидроресурсы, геотермальные ресурсы, возобновляемые биоресурсы), хотя они должны и будут использоваться в будущем;
- исчерпаемость запасов органических энергоресурсов за исключением угля уже в текущем столетии;
- недопустимые экологические последствия использования органического топлива и большинства возобновляемых источников.

Многочисленные исследования, выполненные к настоящему времени, однозначно свидетельствуют, что ограниченность и исчерпаемость энергоисточников, а также неизбежные экологические ограничения исключают возможность ориентации на них в целях обеспечения энергетических потребностей человечества на исторически длительный период.

Из известных к настоящему времени потенциальных энергоисточников, удовлетворяющих необходимым требованиям, реальными считаются:

- ядерные реакторы деления, физической основой которых является цепная реакция деления ядер урана и тория;
- ядерные реакторы синтеза (термоядерные), основой которых является реакция синтеза легких ядер (тритий, дейтерий);
- солнечная энергия — непосредственное преобразование световой энергии Солнца в электроэнергию.

Реакторы деления уже продемонстрировали в промышленных масштабах конкурентоспособность с традиционными станциями на органическом топливе.

Отработанные типы реакторов деления и обоснованные направления их совершенствования позволяют формировать структуру большой атомной энергетике с оптимальным соотношением реакторов различных типов.

В перспективе структура атомной энергетике будет включать реакторы-размножители, тепловые реакторы различного назначения, реакторы для выжигания актиноидов, производства для переработки

отработавшего топлива, хранилища для временного хранения радиоактивных материалов и «могильники» для захоронения радиоактивных материалов.

Включение в структуру реакторов-размножителей, использование замкнутого топливного цикла позволит обеспечить человечество энергией на многие столетия.

Термоядерные реакторы пока что проходят стадию поиска технических решений для реализации стабильной и регулируемой реакции синтеза ядер легких атомов в целях промышленного производства энергии. При успешном решении этой проблемы атомная энергетика получит дополнительные возможности для развития и совершенствования.

Солнечная энергия в настоящее время является объектом интенсивных научных поисков в части непосредственного преобразования в электрическую энергию (минуя тепловую стадию). Созданы кристаллы, которые в лабораторных условиях обеспечивают преобразование световой энергии в электрическую с КПД до 28 %. Ограничителями для промышленного производства электроэнергии на этой основе кроме низкого КПД являются территориальная неоднородность освещения, годовые и суточные изменения освещенности. По-видимому, эффективное решение этих проблем следует связывать с дальнейшим освоением ближнего Космоса.

Из изложенного следует, что реальной альтернативы атомной энергетике пока не просматривается. К этому заключению некоторые ученые-исследователи пришли еще в 60-х годах прошлого столетия (работы Римского клуба).

В 2001 году были опубликованы результаты весьма интересного исследования группы ученых (С.Г.Городков и др.) из Государственного предприятия «Энергия», выполненного по теме: «Можно ли удешевить производство энергии, если отказаться от ядерной энергетики?». Задача формулировалась как динамическая оптимизационная с учетом предпосылок в пользу традиционных видов энергоисточников и, напротив, в ущерб атомной энергетике. Такой подход определял консервативность ответа на поставленный вопрос. Большой временной интервал рассмотрения (500 лет) диктовался требованиями динамических оптимизационных задач. Сравнительное исследование показало, что развитие энергетике без ядерных энергоисточников обойдется человечеству почти в 5 раз дороже по затратам, чем с использованием атомной энергии. При этом в последнем случае в значительной мере сохраняются запасы угля, природного газа, нефти и за пределами рассмотренного интервала, или расходуются для других целей, не связанных с энергопроизводством. Следует обратить внимание на колоссальный масштаб средств, высвобождаемых при использовании атомной энергетике (~ $90 \cdot 10^{12}$ дол. США), которые могут быть использованы человечеством в интересах повышения жизненного уровня и культуры людей.

3. Вопросы безопасности атомной энергетики

Следует отметить, что все виды энергетики, которые человечество использовало на протяжении своей истории, потенциально в той или иной степени были опасны и для людей, и для окружающей среды. Эта опасность возрастала с ростом мощности энергоисточников. Поэтому человек издревле вынужден был принимать (в основном, методом проб и ошибок) какие-то защитные предупредительные меры по отношению к используемым энергоисточникам.

С рождением атомной энергетики решение задач предупреждения проявления потенциальной опасности и ограничения последствий аварийных ситуаций было поставлено на научную основу. Под безопасностью в атомной энергетике понимают обеспечение допустимых по санитарным нормам условий для обслуживающего персонала, населения в целом и нормируемого воздействия на окружающую среду как при рабочих режимах, так и при аварийных ситуациях.

Сложившаяся к настоящему времени методология решения задач гарантированной безопасности включает:

- исследование безопасности на стадии проектирования реакторной установки и АЭС в целом;
- обеспечение контроля в процессе эксплуатации АЭС за параметрами, характеризующими состояние АЭС, включая уровень безопасности;
- исследование безопасности при обращении с отработавшим топливом;
- исследование безопасности при проведении ремонтных работ, выводе АЭС из эксплуатации и последующей утилизации.

На основе проведенных исследований разрабатываются мероприятия, формируются технические и организационные решения, которые сводят на нет недопустимые проявления потенциальной опасности ядерного энергоисточника.

При проведении обоснования безопасности стремятся учитывать все факторы, которые могут существенно сказаться на безопасности, включая человеческий фактор.

Акцент на учете человеческого фактора обусловлен тем, что авария с расплавлением активной зоны на АЭС «Три-Майл-Айленд» (США, 1979 г.) и катастрофа на Чернобыльской АЭС (СССР, 1986 г.) инициировались ошибочными действиями персонала.

Рекомендации, разработанные после Чернобыльской катастрофы под эгидой МАГАТЭ международным сообществом ученых, специалистов-атомщиков в обеспечение гарантированной безопасности АЭС, предусматривают исследование в каждом проекте АЭС так называемой постулированной аварии реактора с расплавлением активной зоны в

целях доказательства, что предусмотренные в проекте защитные физические барьеры исключают недопустимые по нормам воздействия на окружающую среду и население. Имеются все основания считать, что реализация этих по обеспечению ядерной и радиационной безопасности позволяет гарантировать безопасность атомных станций (рекомендации вошли в национальные нормативы стран-членов МАГАТЭ).

4. О целесообразности распространения опыта атомной энергетики

Известно, что традиционные энергоисточники на органическом топливе далеко не безопасны для человека и окружающей среды, даже при нормальных (проектных) режимах работы. А угольные станции даже по выбросам радиоактивных продуктов во много раз превышают АЭС.

Стремительный рост населения планеты, увеличение энергопроизводства, насыщение промышленности металлургическими, химическими и другими производствами, резкое увеличение потребления ресурсов недр, биоты и т. д. — все это привело к такому воздействию на среду, что планета уже не способна компенсировать в полной мере наносимый ей ущерб, и, если не выработать научно обоснованных мероприятий, то перспектива угасания жизни на планете Земля может стать реальностью, особенно если учесть, что к середине текущего столетия прогнозируется удвоение населения. Не случайно вопрос о нормировании выбросов начал решаться на международном уровне (конференции в Рио-де-Жанейро, Киото).

В этих условиях удивляет позиция «зеленых» и некоторых политиков, пугающих атомной энергетикой, но не реагирующих на реальные экологические угрозы в традиционной энергетике, промышленности.

Научно обоснованная методология исследования безопасности, сложившаяся в атомной энергетике, в принципе, может и должна быть внедрена в традиционную энергетику и промышленные производства. Это позволит хотя бы притормозить ухудшение экологической обстановки на планете, но не без затрат.

5. При системном подходе неизбежно приходишь к заключению, что атомная энергетика – шаг к становлению ноосферы по Вернадскому

В начале прошлого века академик В.И.Вернадский сформулировал основные положения учения о ноосфере, в основе которого лежит необходимость гармонизации взаимодействия человека и Природы,

которая избавит человечество от глобальной катастрофы. Это предполагает разработку соответствующих норм жизнедеятельности и внедрение их в общественное сознание. Однако на этом пути требуется решение сложных проблем, а именно:

- осознание человечеством необходимости кардинального изменения отношения к окружающей среде, отказа от расточительности в использовании природных ресурсов; такого понимания еще нет;
- большая часть мероприятий, направленных на гармонизацию общения человека с природой, требует действий общепланетарного масштаба;
- чисто рыночные формы экономики, имеющие сугубо потребительский характер, не позволяют разработать необходимые эффективные механизмы гармонизации деятельности человека с природой и внедрить их на планете в целом. Для этого признается необходимым поиск рационального сочетания опыта рыночной экономики конвергентного (а не дикого) капитализма и плано-распределительной экономики социализма.

Решению этих проблем, несомненно, будет способствовать становление этапа информационного общества. Широкое развитие атомной энергетики создает условия для преодоления экологических проблем, снижения нагрузки на природу, более рационального использования природных ресурсов и тем способствует постепенному переходу общества к ноосфере.

Но не следует думать, что достижение указанных целей возможно только за счет технических мероприятий. На мой взгляд, их достижение в не меньшей степени зависит от воспитания Нового Человека, Человека с высокой духовной культурой. Но это предполагает целенаправленную, продуманную работу по воспитанию подрастающего поколения с ясельного возраста. Сложность этой проблемы видна на примере нашей страны. Мы умудрились сделать зигзаг от достигнутого на 180°, создали криминально-мафиозное общество, утрачиваем ведущие позиции в науке, образовании, сознательно развращаем через кино, радио, телевидение подрастающее поколение.

И нужно признать, что значительная доля за это падает на нашу интеллигенцию и, в первую очередь, на ее научно-техническую часть, из-за ее необъяснимой инертности.

Как видите, уважаемые господа, есть над чем думать, размышлять, есть что искать, если мы хотим и для нашей страны лучшего будущего.

Благодарю за внимание.

Перспективы развития ядерной энергетики России¹

С окончанием XX столетия завершился и начальный этап становления и развития ядерной энергетики. На этом этапе были разработаны, исследованы и опробованы разные типы реакторных систем, возможные ядерные топливные циклы, проведены технико-экономические исследования, проанализированы варианты структуры ядерной энергетики, использование и переработка отработавшего ядерного топлива, обращение с радиоактивными отходами, их захоронение и др. Основным результатом проведенных на этом этапе работ явился выбор нескольких типов реакторов – ВВЭР (*PWR*), РБМК (*BWR*), быстрые (*FBR*), на которых в промышленных масштабах было продемонстрировано эффективное использование атомной энергии для производства тепловой и электрической энергии.

Опыт создания и эксплуатации коммерческих АЭС, тщательный анализ аварийных ситуаций позволили международному сообществу ученых и специалистов осознать, что ядерная энергетика по своей природе является международной и предполагает согласованное определение необходимых условий ее безопасного существования.

Под эгидой МАГАТЭ были сформулированы обоснованные рекомендации по ядерной и радиационной безопасности для населения и окружающей среды, которым необходимо следовать при проектировании, сооружении и эксплуатации АЭС. Указанные рекомендации учитывались при формировании национальных нормативов. Не менее значимым результатом следует считать и отработку методологии проектирования и сооружения атомных станций, обоснования безопасности, ресурсной надежности оборудования и составляющих систем.

Все это позволяет говорить о завершении этапа становления ядерной энергетики как отрасли экономики, поскольку созданы исходные предпосылки для ее масштабного развития и совершенствования.

К настоящему времени уже 17 % мирового производства электроэнергии приходится на АЭС. В Европе эта доля составляет 30 %, в России – 14 %. Однако общественность многих стран, включая и страны, эксплуатирующие АЭС, продолжает обсуждать вопрос: нужна ли ядерная энергетика человечеству? Имеют место случаи, когда

¹ Журнал «Атомная энергия», т. 92, вып. 1, январь 2002, с. 3–7. Автор – Митенков Ф.М.

под давлением общественных движений на законодательном уровне принимаются решения о закрытии АЭС (Швеция, Германия). Это свидетельствует об отсутствии эффективных форм придания должного приоритета заключениям ученых и специалистов при принятии решений по проблемам, имеющим стратегическое значение для общества, поскольку сложность обсуждаемых проблем во многих случаях исключает возможность объективных представлений по этим вопросам на непрофессиональном уровне. Обоснованный ответ на поставленный вопрос может быть только результатом системных исследований с учетом всех определяющих факторов, включая оценки темпа роста энергопотребления, топливных ресурсов, экологических последствий использования энергоисточников разной природы и др.

Из проведенных исследований можно выделить следующие результаты, имеющие непосредственное отношение к обсуждаемому вопросу:

- неравномерное энергопотребление в разных странах и регионах в расчете на одного человека в год, кВт·ч: в США – 14 000, Европе – 6700–7900, России – 6000, Латинской Америке – 100–200 [1];
- наибольший энергодефицит наблюдается в странах с высокими темпами роста населения;
- истощение запасов органического топлива, например, такая ситуация может реализоваться уже к середине текущего столетия для нефти;
- перманентный рост стоимости органического топлива;
- сжигание органического топлива, особенно нефти, газа – не лучшая форма их использования в интересах человека;
- загрязнение окружающей среды продуктами сгорания, аварийными утечками нефти, газа при транспортировке;
- загрязнение планеты, которое может достигнуть недопустимых пределов по своим последствиям, если развивающиеся страны будут удовлетворять растущие энергопотребности за счет органического топлива при достижении уровня энергопотребления, характерного, например, для России;
- необходимость использования альтернативных энергоисточников.

Известные на сегодня виды энергоисточников по своим возможностям не могут быть альтернативой органическому топливу. Единственным реальным исключением в предвидимом будущем является атомная энергия. Отсюда следует, что без ядерной энергетики устойчивое прогрессивное развитие человеческой цивилизации в планетарном масштабе невозможно. Поэтому ее системное развитие, учитывая большую инерционность, откладывать на неопределенное будущее нецелесообразно и недопустимо.

Может казаться, что, ограничившись рассмотрением данного вопроса применительно только к России, можно прийти к иному заключению, поскольку Россия располагает большими запасами органического топлива, большой территорией, ее слабой заселенностью. Однако это не так, что объясняется другими реалиями. В настоящее время для России актуально сооружение новых или модернизация действующих электростанций, ТЭЦ и отопительных котельных вследствие того, что износ основных фондов приближается к уровню, представляющему угрозу энергетической безопасности страны [2–4].

Выбор типа замещающих электростанций в каждом конкретном случае должен быть результатом системного технико-экономического анализа с учетом прогнозируемых изменений стоимости топлива, планируемого срока службы, отношения законодателя к финансовой компенсации загрязнения окружающей среды.

Для атомной энергетики характерны:

- устойчивая тенденция уменьшения воздействия на окружающую среду по мере совершенствования оборудования и систем энергоблоков;
- стабильность цен на ядерное топливо, чему способствует высокий уровень развития ресурсной базы, включая комплекс производств топливного цикла;
- тенденция дальнейшего увеличения срока службы АЭС.

Эти принципиальные особенности, безусловно, способствуют –

- конкурентоспособности ядерной энергетики и в России.

По географическим, климатическим условиям, экономической освоенности и заселенности территория нашей страны неоднородна. Соответственно и энергообеспеченность регионов неодинакова. Большая часть промышленных предприятий расположена в регионах, не имеющих собственных топливных ресурсов. Значительная часть территории находится в зоне сурового климата, где температура в зимнее время достигает 50–60 °С ниже нуля, отсутствуют энергетические сети, железные дороги, постоянное автомобильное сообщение. Доставка топлива в эти регионы является организационно сложной, дорогостоящей, трудноосуществимой задачей. Но зачастую недра именно этих регионов богаты ценными ископаемыми, дефицитными рудами, минералами, разработка которых невозможна без стабильного энергоснабжения. Атомные ТЭЦ малой мощности при определенных условиях могут оказаться предпочтительным решением задачи по сравнению с традиционными дизельными и газотурбинными станциями.

Наша страна одной из первых начала исследования и разработки по малой атомной энергетике. К настоящему времени разработан

проект демонстрационной плавучей АТЭЦ электрической мощностью 60 МВт с одновременным отпуском 52 Гкал/ч тепловой энергии, который базируется на многолетнем успешном опыте эксплуатации ледокольных ЯЭУ. Принято решение о строительстве этой АТЭЦ.

Таким образом, для нашей страны актуальными являются следующие направления развития ядерной энергетики:

- продление ресурса действующих АЭС с соответствующим обновлением надежности и безопасности;
- создание новых конкурентоспособных АЭС большой мощности для замещения исчерпавших ресурс станций на органическом топливе в промышленно развитых регионах и особенно в тех, где экологические преимущества АЭС могут иметь решающее значение;
- создание АТЭЦ или АЭС малой мощности для автономного энергоснабжения развивающихся регионов.

Продление ресурса действующих АЭС может быть экономически эффективным мероприятием, поскольку к моменту исчерпания назначенного ресурса затраты на сооружение АЭС, как правило, уже возмещаются. Поэтому если дополнительные затраты, связанные с продлением ресурса и достижением требуемого уровня безопасности не являются чрезмерными, продление ресурса обеспечивает повышенную доходность АЭС.

При создании новых АЭС большой мощности имеются все основания утверждать, что они будут ориентироваться на эволюционное совершенствование энергоблоков с водо-водяными (ВВЭР) и быстрыми реакторами, поскольку возможности реакторных установок этих типов не исчерпаны, а использование уже оправдавших себя проектных решений способствует повышению качества проектов, уменьшению объема исследований в обоснование их надежности и безопасности, сокращению времени на разработку проекта и в конечном итоге – на сооружение АЭС.

Капитальные затраты на сооружение АЭС с быстрыми реакторами имеют заметное превышение по сравнению с ВВЭР. Однако использование и развитие быстрых реакторов – необходимое условие реализации расширенного воспроизводства ядерного топлива и замкнутого топливного цикла, что в перспективе и будет определять развитие ядерной энергетики. Проведенные к настоящему времени исследования и проектные разработки с учетом имеющегося опыта подтверждают возможности существенного снижения капитальных затрат и улучшения технико-экономических характеристик АЭС с быстрыми реакторами за счет уменьшения их металлоемкости, оптимизации биологической защиты, увеличения выгорания топлива до >15 % т.а., совершенствования строительных решений АЭС в целом.

Определяющими направлениями повышения технико-экономических показателей и конкурентоспособности АЭС большой мощности являются увеличение мощности реактора и энергоблока в целом, повышение срока службы АЭС до 50–60 лет, повышение глубины выгорания топлива с одновременным увеличением времени между перегрузками, совершенствование эксплуатации АЭС, обслуживания, обращения с отработавшим топливом. В работе [5] сообщается, что повышение безопасности и эффективности эксплуатации АЭС США с 1990 г. вследствие модернизации эквивалентно вводу 12 новых крупных энергоблоков. В России за счет повышения коэффициента использования оборудования АЭС в 1999 г. выработка электроэнергии увеличилась на 14 % [4].

Однако нет оснований считать, что эволюционное совершенствование известных типов реакторных установок исключит поиск принципиально новых проектных решений, которые могут увеличить экономическую эффективность АЭС. Например, известно, что термодинамический КПД энергоблоков с ВВЭР относительно низкий (30–33 %). В то же время имеется промышленный опыт использования энергоблоков на органическом топливе при закритических параметрах пара, когда КПД может превышать 50 %. Масштабность технико-экономических последствий при оптимальной реализации столь значительного повышения КПД очевидна. Решение проблемы сводится к созданию реакторной установки на закритических параметрах водяного теплоносителя, так как опыт создания и эксплуатации паротурбинного комплекса на закритических параметрах пара уже имеется.

Конечно, нельзя исключать в будущем значительного повышения эффективности энергоблоков АЭС за счет принципиально новых проектных решений и с другими типами реакторов, например, с высокотемпературным реактором с гелиевым теплоносителем.

Следует иметь в виду, что энергоблоки большой мощности не могут иметь сколько-нибудь заметного использования в развивающихся странах и изолированных регионах. АЭС с мощными энергоблоками будут сооружаться в развитых странах и регионах, располагающих электросетями, необходимой инфраструктурой и кадрами для их эксплуатации.

Для России сооружение новых АЭС большой мощности в ближайшие десятилетия будет ограничиваться бюджетными финансовыми возможностями, поскольку рассчитывать на заметное участие коммерческого капитала не приходится вследствие относительно длительных сроков окупаемости затрат на сооружение АЭС и неопределенности развития экономики страны. Преодоление этих трудностей, по-видимому, возможно на пути создания специального

фонда за счет целевых отчислений энергопроизводителей и энергопотребителей.

Более оптимистично проблема инвестиций в России, включая участие коммерческого капитала, может выглядеть для малой атомной энергетики, если будут найдены проектные и организационные решения, обеспечивающие приемлемые технико-экономические характеристики, включая сроки окупаемости затрат. Относительно малая мощность атомных станций и особенности предполагаемых регионов их использования в значительной степени определяют предъявляемые к ним технические, эксплуатационные и экономические требования. Специфика указанных требований определяется стремлением предельно упростить эксплуатацию и обслуживание станции, свести к минимуму численность эксплуатационного персонала. Для этого в максимальной степени необходимо использовать пассивные средства и системы безопасности, обеспечить высокую ресурсную надежность оборудования и систем, свести к минимуму число перегрузок топлива и в пределе вообще исключить их. Объем работ на строительной площадке должен быть сведен к минимуму за счет высокой степени заводской готовности и блочной поставки оборудования и систем. Технология утилизации энергоблока после выработки ресурса должна быть максимально упрощена. Минимизация сроков сооружения станции (до 2–3 лет) и стоимости вырабатываемой электроэнергии – не выше 0,9–1,2 руб./(кВт·ч) – необходимые условия конкурентоспособности таких АЭС.

Следует ожидать, что первые эффективные образцы энергоблоков малых АЭС будут базироваться на ВВЭР, поскольку накоплен наибольший опыт их эксплуатации.

Достигнутый к настоящему времени уровень надежности оборудования АЭС, степень и качество автоматизации управления, профилактического обслуживания систем дают основания считать, что исходная база для создания АЭС малой мощности с указанными характеристиками имеется.

Длительный опыт эксплуатации атомных ледоколов показывает и возможность значительного уменьшения численности эксплуатационного персонала за счет организационно-технических мероприятий. Известно, что эксплуатация двухреакторных ЯЭУ на ледоколах обеспечивается персоналом численностью около 50 чел.

Однако при использовании традиционных проектных, конструкторских и организационных решений, оправдавших себя при создании АЭС большой мощности, нельзя рассчитывать на удовлетворение всех специфических требований, предъявляемых к АЭС малой мощности, включая их конкурентоспособность. Скорее

всего, потребуется поиск принципиально новых проектных решений, которые в полной мере используют дополнительные возможности, обусловленные малой мощностью реактора, но базируются на накопленных знаниях, опыте создания и эксплуатации атомных энергоисточников различных видов и назначения.

Обсуждая перспективы развития ядерной энергетики, нельзя исключать из рассмотрения проблемы обращения с радиоактивными отходами, их захоронения, хранения отработавшего ядерного топлива, восстановления загрязненных радиоактивными продуктами территорий. Их решение должно быть составной частью программ по дальнейшему развитию ядерной энергетики. Эти проблемы в России и мире в целом исследованы весьма глубоко, определены направления практического решения задач по созданию надежных хранилищ и захоронений. Следует отметить особую роль быстрых реакторов в решении проблемы захоронения продуктов переработки отработавшего топлива АЭС. Они, по-видимому, будут наиболее эффективным средством выжигания актиноидов, наличие которых существенно усложняет требования к захоронению. К настоящему времени имеются условия для разработки норм, правил, стандартизации некоторых решений и др., строгое следование которым должно гарантировать исключение недопустимого воздействия на окружающую среду при любых физически возможных геологических изменениях в местах захоронения РАО в течение столетий.

Концепция и проектные решения реакторов нового поколения¹

Аварии на АЭС «Три-Майл-Айленд» (США) и Чернобыльской АЭС обусловили необходимость ревизии сложившихся к тому времени взглядов на возможности и ограничения атомной энергетики, ее место в энергообеспечении, условия, которым должны отвечать создаваемые энергоисточники. Определяющей при ревизии явилась безопасность атомных станций, пути и средства ее обеспечения и обоснования.

Обмен информацией, открытое обсуждение проблем специалистами разных стран позволяют в настоящее время говорить о концептуальных положениях, определяющих условия обеспечения безопасности ядерных энергоисточников и перспективы развития ядерной энергетики, которые поддерживают международное сообщество.

Дальнейшее развитие ядерной энергетики в значительной степени будет зависеть от качественного решения следующих узловых проблем:

- обоснование возможности создания безопасных реакторов;
- повышение экономических характеристик с учетом жизненного цикла АС;
- преодоление негативного отношения общественности.

Поскольку потенциальная опасность АС с реакторами любого типа является неустранимой их особенностью, обеспечение безопасности должно сводиться к системе технических мероприятий, гарантирующих защиту окружающей среды от недопустимых воздействий при любых технически возможных авариях. Направления и способы достижения безопасности АС в основном определились и во вновь разрабатываемых проектах не принципами, а совершенством технических решений, которые должны способствовать предотвращению аварийных состояний и обеспечивать минимально необходимый контроль и управление аварийными процессами, а также ограничение последствий аварий.

Выполненные к настоящему времени исследований позволяют считать, что безопасность АС достигается при выполнении следующих требований:

¹ Журнал «Атомная энергия», т.7, вып. 4, апрель 1993, с. 290–294.
Авторы: Митенков Ф.М., Кууль В.С., Самойлов О.Б. и др.

- реализация внутренней самозащитенности реактора за счет отрицательных температурных (мощностных) обратных связей в активной зоне и тепловой инерционности реактора;
- использование пассивных систем для защиты и аварийного расхолаживания, не требующих для своего включения и функционирования подачи энергии извне и вмешательства оператора;
- учет ошибки оператора как фактора, усугубляющего развитие аварии;
- организация достаточной системы защитных барьеров на пути возможного распространения радиоактивных продуктов для исключения их поступления в окружающую среду при любых технически возможных авариях;
- внедрение диагностических средств, обеспечивающих качественный контроль оборудования и систем (в первую очередь ответственных за безопасность) и возможность определения остаточного ресурса.

При формулировании требований к ядерным энергоисточникам следует учитывать перспективу их использования не только для производства электроэнергии. Несомненно, что со временем ядерная энергетика найдет свое место и в отраслях промышленности, потребляющих много тепловой энергии, в частности, высокотемпературной. Коммунальное теплоснабжение крупных городов наиболее рационально решается также с помощью специализированных атомных станций (АСТ, АТЭЦ). Ядерные энергетические установки уже сейчас хорошо зарекомендовали себя не только на кораблях ВМФ, но и на гражданских судах (атомные ледоколы, контейнеровоз «Севморпуть», рудовоз «Отто Ган»).

Следует заметить, что без комплексного внедрения атомной энергии в энергоемкие отрасли экономики не может быть решена экологическая проблема, которая, как представляется на данном уровне знания, только ей и под силу. У большинства специалистов, по-видимому, не вызывает сомнений утверждение, что на ближайшие несколько десятилетий уже определились типы реакторов, которые будут создаваться и использоваться в промышленных масштабах – ВВЭР, быстрые и высокотемпературные реакторы. Область использования того или иного типа реактора определит самостоятельные направления развития технических решений со своими критериями оптимальности (при сохранении общих требований и условий обеспечения безопасности). Так, низкие параметры теплоносителя первого контура, характерные для атомных станций коммунального теплоснабжения, существенно влияют на оптимальность схемных и конструктивных решений реакторов и установки в целом. В атомных

станциях малой мощности, предназначенных для автономных регионов, изолированных от электрических сетей, малая мощность также существенно влияет на выбор конструкционных решений. Еще в большей степени схемные, конструкционные и компоновочные решения реакторных установок определяются специфическими условиями использования атомной энергии на судах.

Конечно, и сейчас, и тем более в будущем будут и должны предприниматься исследования по созданию других реакторов, лишенных недостатков или «узких мест», характерных для перечисленных реакторов. Однако к настоящему времени пока не проявились перспективные направления поиска реакторов нового типа, с учетом неизбежного значительного объема НИОКР, заведомо составляют не менее 15 лет, то представляется обоснованным утверждение, что развитие ядерной энергетики на ближайшие десятилетия будет базироваться на реакторах уже известных типов, усовершенствованных с учетом накопленного эксплуатационного, практического опыта и ужесточающихся требований по безопасности.

Перспективы улучшения экономических характеристик ядерной энергетики (при увеличивающихся затратах на повышение безопасности АС) будут определяться исследованиями по следующим направлениям:

- оптимизация структуры ЯЭ из условия реализации замкнутого топливного цикла, то есть с использованием нарабатываемого в различных реакторах плутония в качестве ядерного топлива (при этом специфические характеристики плутония в значительной степени определяют соотношение реакторов различных типов в структуре ЯЭ);
- снижение капитальных затрат при сооружении АС за счет сокращения сроков строительства, стандартизации проектных решений, технологии и организации работ, увеличения ресурса оборудования и АС в целом;
- дальнейшая оптимизация состава активной зоны, совершенствование технологии производства ядерного топлива, твэлов, режима перегрузок для увеличения выгорания;
- совершенствование конструкционно-компоновочных схем реакторных установок;
- минимизация радиоактивных отходов.

Вопрос о значимости компоновочных решений требует пояснений. Компоновочная схема реакторных установок определяет многое в способах и средствах обеспечения безопасности, строительных решениях, условиях эксплуатации и, в конечном счете, в экономических показателях. Известны три типа компоновочных схем установок:

петлевая, блочная и интегральная. Эти схемы приемлемы для всех типов реакторов. Оптимальный выбор в каждом конкретном случае определяется различными факторами, и поэтому невозможно говорить об универсальных рекомендациях. Однако о преимуществах и недостатках каждой из указанных схем можно высказать соображения.

Для *петлевых реакторных установок* характерна значительная пространственная распределенность и большой объем первого контура, наличие трубопроводов большого диаметра, соединяющих основное оборудование: парогенераторы, насосы, теплообменники, компенсаторы объема и др. Для этой схемы серьезной проблемой является организация защиты при аварийном разрыве трубопроводов первого контура большого диаметра. Большая часть действующих АЭС использует установки с петлевой схемой. Практика показывает, что значительным достоинством этой схемы является доступность оборудования для профилактического контроля и ремонтных работ, что особенно важно в тех случаях, когда оборудование не отличается высокой надежностью.

Интегральная компоновка впервые нашла применение в быстрых реакторах с натриевым теплоносителем. В частности, на Белоярской АЭС в течение 12 лет* безаварийно эксплуатируется такой реактор БН-600. Очевидным преимуществом этой компоновки является локализация теплоносителя первого контура в одном объеме внутри корпуса (бака) реактора, отсутствие патрубков и трубопроводов большого диаметра, что, конечно, резко уменьшает вероятность течи теплоносителя. При интегральной компоновке снимается проблема охрупчивания материала корпуса реактора под действием излучения. Действительно, флюенс нейтронов для корпусов реакторов АСТ-500, ВПБЭР-600, выполненных по интегральной схеме, не превышает 10^{17} см⁻². При таком флюенсе, как известно, заметных изменений механических свойств корпусной стали не наблюдается. Интегральная компоновка реактора допускает реализацию идеи страховочного корпуса. В этом случае удастся исключить опасность осушения активной зоны и тем самым существенно упростить расхолаживание реактора в аварийных ситуациях. При интегральной компоновке принципиально упрощается организация и производство работ для повторного использования площадки или ее восстановления до состояния «зеленой лужайки». Но в интегральной компоновке затруднен доступ к оборудованию, размещенному в реакторе, что ограничивает или усложняет его ремонтное обслуживание. Поэтому интегральная компоновка предполагает

* Статья написана в 1992 г.

использование высоконадежного оборудования, созданного на основе решений, подтвержденных эксплуатацией, и прошедшего представительную ресурсную проверку в лабораторных условиях. Интегральная компоновка приводит к значительному увеличению массы и габаритов реактора. Поэтому требуются новые решения по организации производства работ по изготовлению и монтажу реактора. В случае реакторов БН-600 и «Суперфеникс» сварку корпусов реакторов и монтажные работы проводили на строительной площадке. Водно-водяные реакторы при интегральной компоновке имеют существенно меньший диаметр по сравнению с быстрыми реакторами: диаметр корпуса БН-600 — 12 м, а ВПБЭР-600 — 6 м, и допускают доставку с завода-изготовителя на строительную площадку транспортными средствами, что подтверждено опытом строительства АСТ-500.

Блочная компоновка занимает по существу промежуточное положение между петлевой и интегральной схемами. Вместо протяженных трубопроводов первого контура появляются короткие патрубки большого диаметра, соединяющие основное оборудование установки (реактор, парогенератор, насосы). Увеличенный диаметр патрубков по сравнению с петлевой схемой обусловлен использованием в блочной компоновке наиболее рациональной организации входа и выхода теплоносителя по принципу «труба в трубе». При блочной компоновке силовая схема установки коренным образом изменяется, по сравнению с петлевой, и требует более глубоких исследований для реализации. Патрубки по технологии изготовления, качеству контроля, предъявляемым требованиям должны в полной мере соответствовать корпусу реактора. Как и корпус реактора, материал патрубков и их нагружение должны отвечать критерию «течь перед разрушением». Блочная компоновка нашла применение в судовых реакторных установках, например, на атомных ледоколах. Она позволяет уменьшить габариты и обеспечивает доступность для ремонтного обслуживания.

Из приведенного сравнительного анализа следует, что интегральная компоновка привносит дополнительные качественно новые возможности для повышения безопасности АС, которых нет в двух других схемах, но ее применение оправдано только при высокой надежности, отработанности внутриреакторного оборудования. Если иметь в виду, что к настоящему времени исследовано значительное число разнообразных пассивных систем безопасности, приспособленных к различным схемам установок, то изложенные соображения позволяют считать, что уже известные наработанные технические решения могут обеспечить безопасность реакторов. Перед

проектантами стоит, по существу, задача оптимизации этих решений по параметрам, определяющим безопасность и экономичность АС.

Дополнительного обсуждения требует проблема аварии с повреждением активной зоны. Совокупность решений, диктуемых требованиями безопасности, исключает масштабное повреждение и тем более полное расплавление активной зоны. Кроме того, реализация таких проектных решений, которые бы исключали недопустимые выбросы радиоактивных продуктов в окружающую среду и при постулировании расплавления активной зоны, является заманчивой. Однако можно заведомо предвидеть, что эти решения не будут простыми и дешевыми и, скорее всего, будут избыточными. Какой же выход?

Представляется целесообразным изучить совокупность физико-химических процессов, связанных с расплавлением активной зоны, сформулировать представительную математическую модель аварийного состояния и рассмотреть возможные проектные решения, предупреждающие недопустимые последствия для окружающей среды.

Как уже отмечалось, будущее ядерной энергетики определяется не только техническими вопросами, но и отношением к ней широкой общественности. Реакция общественности на аварии на АЭС — естественная защитная реакция. Поэтому отношение специалистов к позиции общественности должно быть таким же, как к любому другому объективному фактору, определяющему принятие технических или организационных решений. Сложность проблемы заключается в том, что общественность невосприимчива к технической логике. Необходим поиск других путей и способов доведения до широкой общественности объективной информации об истинном состоянии ядерной энергетики и ее перспективности для нашей цивилизации.

Предложения в обеспечение перспективного развития атомной энергетики России в XXI столетии¹

1. Современное состояние атомной энергетики (АЭ) в мире и в России в частности можно рассматривать как завершение начального этапа ее становления. Этот этап позволил выявить основные условия использования АЭ, выработать требования к проектным решениям, которые в значительной степени определяются задачами обеспечения гарантированной безопасности. На этом этапе было исследовано довольно большое число реакторных установок различных типов, часть из них прошла и через стадию экспериментальных испытаний.

Однако только два типа реакторов вышли на стадию промышленного использования:

- реактор с водой в качестве теплоносителя-замедлителя с тепловым спектром нейтронов;
- реактор на быстрых нейтронах с натрием в качестве теплоносителя.

При этом подавляющая часть действующих АЭС использует реактор с водой в качестве теплоносителя-замедлителя.

Эксплуатация этих реакторов позволила выявить их недостатки, ограничения, которые определяют программы их дальнейшего эволюционного совершенствования (повышение термодинамического КПД, ресурсной надежности, сроков службы, снижение капитальных затрат и эксплуатационных расходов, стандартизация энергоблоков и др.), стимулируют исследования для преодоления существующих ограничений, включая и создание других типов реакторов.

2. Растущая потребность в энергопотреблении, ограниченность запасов органического топлива, задача кардинального решения экологических проблем обуславливает необходимость дальнейшего развития атомной энергетики. А это предполагает в качестве необходимого условия решение весьма актуальной задачи — обоснования структуры будущей атомной энергетики. Такое обоснование может быть достигнуто только в результате системного анализа с учетом всех требований, которые предъявляются к энергетике вообще.

¹ Предложения к разработке «Стратегии развития атомной энергетики России», 1999 г.

К настоящему времени по различным аспектам структуры АЭ будущего выполнено много исследований. Однако нет оснований думать, что они должным образом согласованы, интегрированы и позволяют выработать однозначные рекомендации. Исследования должны продолжаться, и конкретизация любой структуры, которая будет сформулирована, несомненно, будет продолжаться по мере накопления опыта эксплуатации новых реакторов и обеспечивающих систем.

По-видимому, неизменными требованиями к структуре АЭ будут только обеспечение расширенного воспроизводства делящихся изотопов и гарантированной безопасности.

3. При обосновании оптимальной структуры атомной энергетики будущего следует отталкиваться от достигнутого и учитывать реальное состояние энергетики в целом. Поскольку фактическое состояние энергетики в разных странах существенно различно и в количественном, и в качественном отношении, не исключается, что и предложения по перспективной структуре АЭ и техническим направлениям ее реализации, исходящие от разных стран, будут заметно различаться.

Поэтому, если придерживаться исходного положения, что АЭ и ее развитие являются международной проблемой и, следовательно, ее решение должно учитывать особенности и интересы всех стран, то при разработке структуры АЭ будущего и ее реализации заведомо необходимо ориентироваться на коллегиальный подход, то есть предусматривать обсуждение различных возможных вариантов в целях учета обоснованного разнообразия интересов потенциальных пользователей. Это предполагает наличие методологии обоснования оптимальности структуры АЭ, выбора определяющих параметров и соответствующих критериев.

4. Известно, что российские ученые и специалисты с первых шагов АЭ однозначно связывали ее развитие с реализацией расширенного воспроизводства делящихся нуклидов и замкнутого топливного цикла. Этим определился в СССР практически одновременный выбор двух типов реакторов для атомной энергетики: тепловых реакторов с водой в качестве теплоносителя-замедлителя и быстрых реакторов с теплоносителем натрия. По мере совершенствования тепловых реакторов (ВВЭР, РБМК) расширялась область исследований возможного использования тепловых реакторов, проводились соответствующие проектные разработки, экспериментальные исследования.

Весьма большая исследовательская работа и соответствующие проектные разработки по обоснованию быстрых реакторов завершились созданием двух крупных энергетических реакторов БН-350 и БН-600, эксплуатация которых подтвердила их ресурсную надежность и безопасность.

5. Проведенные исследования и проектные разработки подтверждают потенциальную возможность эффективного использования атомной энергетики не только для выработки электроэнергии на достаточно мощных АЭС, но и для удовлетворения потребностей в высокотемпературной тепловой энергии некоторых производств (переработка нефти, получение органических удобрений, дешевого водорода и др.). Относительно низкотемпературная тепловая энергия необходима для коммунального теплоснабжения, опреснения морской воды и др.

Большое географическое разнообразие России, наличие больших слабоосвоенных территорий, не имеющих развитых транспортных и энергетических связей с основными экономическими регионами, обуславливают необходимость в автономных энергоисточниках для получения электрической и тепловой энергии. Оптимальным вариантом решения этой задачи является использование атомной энергетики в форме АТЭС, проекты которых должны учитывать всю совокупность требований, характерных для места расположения.

6. С учетом изложенного для России перспективными направлениями дальнейшего развития атомной энергетики и формирования ее структуры следует считать:

- совершенствование реакторов типа ВВЭР в целях повышения ресурсной надежности, срока службы, технико-экономических и эксплуатационных показателей, уровня безопасности;
- реализацию в реакторах с водой в качестве теплоносителя закритических параметров пара с целью резкого повышения термодинамического КПД (до 45–47 %); при этом должны рассматриваться два варианта: двухконтурная и одноконтурная схемы РУ (в 70-х годах в ОКБМ подробно исследовалась двухконтурная схема с закритическими параметрами применительно к судовым РУ);
- совершенствование реакторов типа БН в целях повышения ресурсной надежности, сроков службы, технико-экономических и эксплуатационных показателей, уровня безопасности; направления совершенствования: переход на корпусной парогенератор, использование закритических параметров пара, повышение выгорания ядерного топлива до ~15 % т.а., исследование и освоение новых видов топлива, имеющих преимущества по сравнению с диоксидным (например, нитридное, микротопливо и др.); обеспечение использования оружейного плутония и трансмутации отработавшего топлива в целях выжигания долгоживущих нуклидов (актинидов);
- создание высокотемпературного реактора с гелиевым теплоносителем и температурой на выходе из активной зоны до 950–1000 °С,

удовлетворяющего требованиям по безопасности, ресурсной надежности, технико-экономическим и эксплуатационным показателям; проект РУ должен разрабатываться в двух вариантах: одноконтурная РУ с высоким термодинамическим КПД ($> 48\%$) для выработки электроэнергии; двухконтурная РУ для получения высокотемпературной тепловой энергии ($> 800\text{ }^{\circ}\text{C}$) в целях обеспечения соответствующих производств; в обоих вариантах предусматривается глубокое выгорание ядерного топлива с целью исключить переработки отработавшего топлива перед захоронением;

- создание атомных станций коммунального теплоснабжения в двух вариантах: атомная котельная типа АСТ-500 и атомная теплоэлектроцентраль (АТЭЦ); в ОКБМ имеется достаточно большой проектный опыт по указанным РУ: по АСТ имеется опыт изготовления оборудования на отечественных предприятиях и монтажа, полученный при строительстве блоков АСТ в Н.Новгороде и Воронеже;
- создание РУ для малой атомной энергетики с учетом специфики их размещения, полной автономности, минимизации численности обслуживающего персонала; кроме традиционных требований по надежности и безопасности, необходимо обеспечить простоту обслуживания и эксплуатации, исключить перегрузку реактора (либо полностью, либо в течение не менее 15–20 лет работы).

7. При разработке новых реакторов, указанных в п. 5, должны выполняться общепринятые рекомендации МАГАТЭ, требования нераспространения, физической защиты ядерных материалов. Следует иметь в виду также, что в России до сих пор не имеется согласованной и утвержденной методологии сравнения проектов атомных энергоблоков по определяющим показателям, в частности, по затратам и другим экономическим характеристикам; отсутствуют обязательные банки данных, без которых объективное сравнение невозможно.

Учитывая принципиальную значимость обоснованного выбора оптимальных проектов для дальнейшего развития отечественной атомной энергетики, необходимо предусмотреть разработку методологии сравнения, выбора определяющих параметров, технико-экономического обоснования.

8. Весьма важной задачей для России является целенаправленная работа по расширению экспортных возможностей России в области атомной энергетики. Поэтому нельзя допустить какого-либо отставания от ведущих атомных держав в работах по созданию новых реакторов. Планирование и организация по соответствующим направлениям должны учитывать это важнейшее условие для будущего отечественной науки и практики в области атомной энергетики.

Учитывая предельно ограниченные финансовые возможности отрасли, чрезвычайно важно обеспечить порядок достаточно обоснованного выбора перспективных проектных разработок, исследований в целях сведения к минимуму бросовых затрат. В этом плане представляется весьма целесообразным повысить роль Научно-технического совета Министерства, значимость его решений.

9. До сего времени не решенной в международном плане проблемой является порядок обращения с отработавшим ядерным топливом, радиоактивными отходами, получающимися при эксплуатации атомных станций и производств, использующих радиоактивные материалы.

Учитывая пристальное внимание широкой общественности именно к этой части процесса использования ядерной энергии, крайне важно решение этой проблемы на международном уровне, что возможно только при системном подходе к исследованию этой сложной проблемы с доведением до четкого формулирования системы соответствующих требований, норм, правил под эгидой МАГАТЭ.

10. Поскольку атомная энергетика – проблема международная, весьма важно обеспечить рациональное участие России в работе различных международных групп, которые координируют исследования в разных странах в части перспективного развития атомной энергетики. В настоящее время имеются две международные программы *Generation-IV*, ИНПРО (*INPRO*), которые имеют целью обоснование конкретных направлений и задач перспективного развития атомной энергетики.

Мне представляется, что имеющиеся отличия между этими программами нельзя отнести к принципиальным. Поэтому с точки зрения техники их совмещение вполне возможно без ущерба для сторон (если имеются какие-то факторы политического характера, то это не моя компетенция).

Я считаю, что при любом варианте решений не следует допустить изоляцию России от сильной группы *Generation-IV*, которая работает целенаправленно и интенсивно. Поэтому принятие решения по участию России в этой группе необходимо форсировать.

Фото из семейного альбома Ф.М. Митенкова



Большое семейство Митенковых в предвоенные годы.
В центре отец – Михаил Сергеевич, справа мать – Евдокия Захаровна



Мать – Митенкова Евдокия Захаровна со старшим братом
Григорием Михайловичем



1944 год



Студенты – физики 5-го курса СГУ, 1949 год.
В центре зав.каф. А.Д. Степухович



Выпускник СГУ, 1950 год



Январь 1950 год – начало совместной жизни

И.И.Африкантов (1916–1969) – выдающийся конструктор ядерных реакторов и оборудования атомной промышленности, доктор технических наук, Герой Социалистического труда, лауреат Ленинской и Государственной премий. С конца 1951 по 1969 гг. – главный конструктор, а с 1954 г. также и начальник ОКБ. Ему принадлежат основополагающие идеи в создании целого ряда конструкций судовых и корабельных ядерных реакторов и оборудования атомной техники. Звание Героя Социалистического труда присвоено в 1960 г. за создание реакторной установки для первого в мире атомного ледокола «Ленин».





20 лет после окончания университета.

Справа — Людмила Ивановна Митенкова, слева — проф. д.т.н. Тимонин



На депутатском приеме, 1983 год



Приезд в ОКБМ Главкома ВМФ адмирала С.Г. Горшкова
и академика А.П. Александрова



Министр
Е.П. Славский вручает
Ф.М. Митенкову
золотую звезду Героя
Социалистического Труда,
1978 год



С коллективом ОКБМ на демонстрации, 7 ноября 1985 года



Церемония открытия спортивного комплекса ОКБМ «Радуга». Слева от Ф.М. Митенкова председатель профкома В.Г. Кривенчук, 1985 год



Приезд в ОКБМ академика А.П. Александрова и Н.С. Хлопкина,
1987 год



Делегация Минатома в Японии



В Обнинском учебном центре ВМФ (1990 г.)

Слева направо: С.Мищеряков, Н.И.Заборский, В.И.Дорогань, Б.Ф.Громов (ФЭИ), Е.Н.Золотарев, С.Е.Данилин, В.Б. Светлаков, Ф.М.Митенков (ОКБМ), В.Д. Ямков.

Социальная сфера ОКБМ



Открытие базы отдыха «Радуга» на берегу Горьковского моря, 1975 год



На открытии лыжной базы «Морозко», 1983 год



В детском оздоровительном центре «Искра»



Всегда оживленно в спортивном комплексе ОКБМ



На церемонии вручения международной премии
«Глобальная энергия» (19 июня 2004 г., Санкт-Петербург)

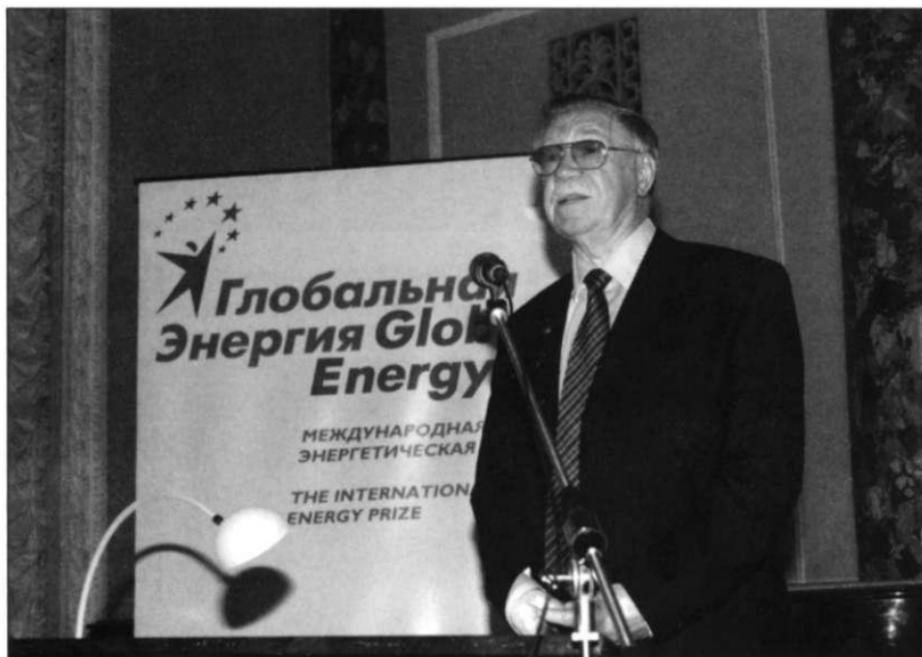




На брифинге лауреатов премии «Глобальная энергия» (ведущий – основатель премии, лауреат Нобелевской премии акад. Ж.И.Алферов)



Выступление на брифинге лауреатов премии «Глобальная энергия»



Выступление с лекцией после вручения премии
«Глобальная энергия»

Опыт ОКБМ в разработке высоконадежных узлов трибосопряжений для циркуляторов атомной энергетики¹

Аннотация

Опытное конструкторское бюро машиностроения им. И.И.Африкантова занимается проектированием, разработкой и изготовлением герметичных насосов и насосов с торцовыми уплотнениями для атомных энергетических установок. Наиболее ответственными элементами насосов являются радиальные и осевые подшипники скольжения и торцевые уплотнения. Подшипниковые опоры и уплотнения, разработанные в ОКБМ, имеют наработку от 25000 до 150000 часов. Организация может разрабатывать, изготавливать опытные образцы, а также организовывать их серийное производство и поставку.

В течение многих лет Опытное конструкторское бюро машиностроения им. И.И.Африкантова занимается проектированием, разработкой и изготовлением герметичных насосов (ГЦНПК) и насосов с торцовыми уплотнениями для атомных энергетических установок и широкого круга различных производств. По условиям эксплуатации циркуляционных насосов для атомных энергетических установок их отличительной особенностью является обеспечение непрерывной и надежной работы в течение длительного времени, исчисляемого десятками тысяч часов, без ремонта и непосредственного обслуживания.

Одними из наиболее ответственных и, в большинстве случаев, определяющими работоспособность насосов, являются радиальные и осевые подшипники скольжения и торцевые уплотнения, в качестве смазывающей и охлаждающей жидкости для которых используется перекачиваемая среда – дистиллированная вода. Для обоснования и обеспечения ресурсной надежности узлов трибосопряжений в ОКБМ создана необходимая экспериментальная база,

¹ Доклад на международном конгрессе «Механика и трибология транспортных систем – 2003». Авторы: Ф.М. Митенков, Э.Г.Новинский, В.П.Ракидин, В.Б.Чистяков. // Сборник докладов конгресса, изд-во «Ростов-на-Дону», 2003, с. 147–149

позволяющая проводить не только испытания материалов пар трения, но и полномасштабные испытания моделей узлов трибосопряжений и сборок на специальных стендах. Отработанные методики позволяют осуществлять расчеты и создавать модели узлов трибосопряжений. После проведения представительных испытаний на стендах и испытаний головного образца насоса, ОКБМ отслеживает их работу в штатных условиях на заказах при промышленной эксплуатации на атомных установках в порядке авторского сопровождения.

Для подшипников герметичных насосов реакторов с водяным теплоносителем применена пара трения, обеспечивающая ресурс не менее 120 тыс. часов [1].

Исходя из специфических требований функционирования циркуляционных насосов, когда вследствие радиационной обстановки нет доступа к подшипникам для профилактического осмотра или ремонта, к ним предъявляются особые требования:

- высокая надежность и безопасность при всех возможных режимах работы, многочисленных пусках, изменениях давления и температуры перекачиваемой среды;
- подшипники должны иметь низкие значения коэффициента трения в течение всего ресурса с целью обеспечить надежность запуска насоса;
- материалы трущихся пар должны обладать повышенной коррозионной стойкостью в нейтронном потоке и выдерживать длительное эрозионное воздействие воды высокой температуры, циркулирующей через подшипник;
- материалы подшипников должны обладать высокой износостойкостью, отсутствием склонности к схватыванию и задирам, высокой стабильностью физико-механических свойств в течение длительного времени, а также не выделять при эксплуатации в продуктах износа коррозионно-активных ионов;
- в отдельных случаях материалы подшипниковых узлов должны быть стойкими к промывочным и консервирующим растворам, сохранять физико-механические свойства и работоспособность после длительного хранения.

Учитывая малую вязкость (по сравнению с маслами) и низкие смазывающие свойства воды, основную роль приобретает правильный подбор материалов трущихся пар.

Исходя из высоких требований, предъявляемых к подшипниковым узлам ГЦНПК, и в целях всестороннего экспериментального исследования материалов подшипниковых опор в ОКБМ была создана исследовательская база, в которую были включены специально разработанные и изготовленные стенды:

- автоклавные стенды;
- стенды для триботехнических исследований материалов пар трения;
- стенды для исследований конструкционной износостойкости подшипниковых узлов.

Автоклавные стенды позволяли выполнять исследования стойкости материалов подшипниковых опор в широком интервале температуры и давления в статических условиях при длительной выдержке в среде воды.

Для исследований триботехнических характеристик пар трения были разработаны и изготовлены пять машин трения. Машины трения позволяли проводить экспериментальные исследования как пар трения, так и моделей подшипниковых узлов и торцовых уплотнений при условиях, существенно превышающих эксплуатационные по нагрузочно-скоростным параметрам.

Окончательное заключение о работоспособности и износостойкости подшипниковых узлов и торцовых уплотнений делалось после испытаний их в составе опытного насоса или в узле уплотнения на экспериментальных стендах.

Подшипниковые опоры, разработанные в ОКБМ, с парой трения: фторопластоуглеграфитовый материал по жаропрочному сплаву (2П-1000-3П по ВЖЛ-2) в составе ГЦНПК на атомном ледоколе «Арктика» отработали более 150 тыс. часов и продолжают эксплуатироваться. Более чем за 30 лет эксплуатации ГЦНПК в составе атомных установок не отмечено ни одного случая отказов насосов в штатных режимах работы по причине выхода из строя подшипниковых узлов. В целях дальнейшего повышения надежности и ресурса подшипниковых узлов, достигнутых на атомных ледоколах, в ОКБМ проводятся испытания перспективных сверхтвердых материалов. Пара трения из силицированного графита позволяет существенно повысить нагрузочную способность подшипниковых узлов. К настоящему времени наработка этой пары в ГЦНПК составила 120 тыс. часов, и испытания продолжаются.

Успешно эксплуатируются торцовые уплотнения в главных циркуляционных насосах [2] АЭС с водяным (РБМ-К) и натриевым теплоносителем (БН) на диапазон диаметров валов 110–250 мм, частот вращения 1000–1500 об/мин и давления среды 0,05–12,0 МПа. По своей конструкции – это типично гидравлически уравновешенные двойные торцовые уплотнения с подачей от внешнего источника питания запирающей воды (для водяных АЭС) или минерального масла (для натриевых АЭС, где уплотняется инертный газ).

Контактные кольца изготавливаются из высокопрочного и износостойкого материала – силицированного графита.

Кольца работают в режиме гидродинамической смазки, что обеспечивает утечки запирающей жидкости не более 25 л/ч для установки РБМ-К и 50 см³/ч для установок типа БН.

Достигнутый уровень герметичности уплотнений и ресурс – 25000 часов для водяных насосов и 50000 часов для натриевых насосов обеспечивают высокую безопасность, надежность и экономичность насосов. Общая наработка уплотнений на 14 блоках РБМ-К составила несколько миллионов часов. Более 30 лет без отказа эксплуатируются торцовые уплотнения на атомных реакторах с натриевыми теплоносителями БОР-60, БН-350, БН-600.

Успешный опыт разработки узлов трибосопряжений для насосов атомной энергетики позволил ОКБМ разработать и внедрить ряд торцовых гидродинамических уплотнений и герметичных насосов для нефтеперерабатывающей, медицинской, химической промышленности и др. В нефтеперерабатывающей промышленности более 10 лет успешно эксплуатируются торцовые уплотнения, перекачиваемыми продуктами являются: гудрон, мазут, отбензиненная нефть, масло, масло с фенолом и др., их ресурс составил не менее 25–30 тыс. часов. Там же находятся в эксплуатации более 20 герметичных насосов, изготовленных в ОКБМ. Нарработка по некоторым насосам без ремонта составила более 60 тыс. часов.

В ОКБМ разработаны также принципиально новые подшипниковые опоры для высокотемпературного реактора с гелиевым теплоносителем. Сверхвысокие нагрузочно-скоростные параметры эксплуатации этих опор, в условиях аварийной остановки газового турбогенератора, ставят сложные проблемы разработки страховочных пар трения для обеспечения аварийного выбега ротора в среде гелия без применения смазки при нагрузках до 9 МПа и скорости скольжения до 100 м/с.

Учитывая достигнутые результаты в создании высоконадежных узлов трибосопряжений для различного назначения и различных условий эксплуатации, целесообразно расширить использование достигнутого опыта для различных отраслей промышленности. ОКБМ может разрабатывать, изготавливать опытные образцы и проводить представительные испытания, а также организовывать их серийное производство и поставку.

Особенности принципиальной схемы и конструкции опытно-промышленного образца высокотемпературного газоохлаждаемого реактора¹

Рассмотрены схема и особенности конструкции реактора, а также задачи, которые должны быть решены на опытно-промышленной установке. Предложенная схема позволяет провести поэтапную отработку установки на различных уровнях температуры.

Высокотемпературные реакторы с гелиевым охлаждением являются новым направлением в атомной энергетике. Их отличительная особенность — принципиальная возможность получения тепловой энергии с высокой температурой — до 1000 °С и более. Такого температурного потенциала нельзя достигнуть в других энергетических реакторах, известных в настоящее время.

Возможные пути использования высокопотенциальной тепловой энергии широко исследуются в нашей стране и за рубежом. Исследования показывают, что повышение температуры тепловой энергии, вырабатываемого в реакторе, до 750–800 °С позволяет применять современные турбины с высокими параметрами пара ($t_{\text{п}} = 530\text{--}580$ °С). Дальнейшее повышение температуры для паротурбинного цикла, по-видимому, нецелесообразно.

Значительно более перспективно использование реактора ВТГР в газотурбинном цикле, а также как источника тепловой энергии для осуществления технологического процесса в различных отраслях народного хозяйства, в которых в виде тепловой энергии потребляется 70–80 % всей вырабатываемой энергии, в частности в наиболее энергоемких процессах химической и металлургической промышленности. Анализ показал, что для замены органического топлива ядерным горючим в этих процессах температура теплоносителя должна быть 950 °С и выше. В реакторе ВТГР такая температура достижима, и это открывает широкие возможности для его использования в данной области.

¹ «Атомно-водородная энергетика и технология», вып. 2, 1979 г., с. 73–77. Авторы: Ф.М. Митенков, Ю.И. Кошкин, О.Б. Самойлов, Е.В. Комаров

Применение высокотемпературных реакторов с гелиевым охлаждением в энерготехнологической установке для производства тепловой энергии рассматривается как главное направление использования реактора. Как показали проектные проработки, экономически наиболее целесообразно комплексное производство высокопотенциальной тепловой энергии и электроэнергии, что позволяет эффективно использовать вырабатываемую теплоту с достаточно высоким КПД.

Для создания промышленных реакторных установок комплексного производства высокопотенциальной тепловой энергии и электроэнергии требуется проведение большого объема научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, выполнение которых позволит решить ряд технических проблем, связанных с получением, транспортированием и использованием тепловой энергии с весьма высокой температурой, освоением гелиевой технологии, разработкой новых видов оборудования и новых материалов.

Учитывая сложность проблемы, представляется необходимым создание опытно-промышленной реакторной установки. Ее назначение – проверка и подтверждение всех принципиальных технических решений, отработка в условиях промышленной эксплуатации основного оборудования и систем установки. Отработка опытно-промышленной установки открывает дорогу для создания промышленных образцов установки и их широкого использования.

Чтобы опыт разработки, изготовления и эксплуатации образца в максимальной степени мог в дальнейшем стать базой для создания промышленных установок, необходимо, в первую очередь, правильно и обоснованно выбрать направление его проектирования и исходные технические параметры, то есть выработать оптимальные технические требования к опытно-промышленному образцу высокотемпературного реактора с учетом его целевого назначения.

Технические требования к опытно-промышленному образцу вытекают из задач, которые им должны решаться:

- 1) проверка и отработка принципиальной схемы установки, включая технологический контур;
- 2) проверка и доводка по результатам эксплуатации конструкций основных видов оборудования и систем, которые заведомо будут в значительной степени оригинальными (газодувка, парогенератор, приводы СУЗ, теплообменник, система очистки, система контроля и др.),
- 3) проверка в эксплуатации конструкций и технологии железобетонного корпуса,
- 4) проверка в условиях длительной эксплуатации новых температуростойких конструкционных материалов и др.

Необходимость представительного решения перечисленных задач исключает возможность использования для этой цели установок малой мощности. Для опытно-промышленной установки можно рекомендовать реактор с тепловой мощностью 1000 МВт. В этом случае основные узлы установки (активная зона, парогенераторы, газодувки, теплообменники) будут обладать достаточной масштабной прототипностью для будущих промышленных установок.

При разработке проекта опытно-промышленной установки большое внимание должно быть уделено оптимизации схемы установки с учетом обеспечения потенциальных возможностей получения информации при разработке новых промышленных энерготехнологических комплексов.

В качестве опытно-промышленного образца может быть рассмотрена установка, предназначенная для получения высокотемпературной тепловой энергии, которая использовалась бы для выработки электроэнергии в АЭС. Реализация такой установки позволила бы отработать основные решения принципиальной схемы, конструкцию оборудования установки, в том числе железобетонного корпуса, освоить в эксплуатации принципиально новый контур с гелиевым теплоносителем, отработать режимы работы установки. В этом случае значительно легче решался бы вопрос о выборе конструкционных материалов, поскольку параметры пара ($t_{\text{п}} = 530\text{--}550\text{ }^{\circ}\text{C}$) могут быть обеспечены при температуре первого контура $750\text{ }^{\circ}\text{C}$. Однако в этом варианте отсутствовали бы возможности проверки схемы технологического комплекса, в котором используется высокопотенциальная тепловая энергия, и отработки оборудования при температуре, которая необходима для промышленного технологического комплекса.

Второй путь – создание непосредственного прототипа энергокомплекса в полном объеме и, следовательно, с рабочей температурой, необходимой для обеспечения выбранного технологического цикла ($t=950\text{ }^{\circ}\text{C}$). Это предполагает разработку новых термостойких материалов и тем самым отодвигает реальные сроки создания опытно-промышленной установки. Кроме того, необходимо учитывать, что пусконаладочные работы на этой установке займут, несомненно, длительный период, и выход на рабочий уровень температуры будет постепенным. Основной объем составляют пусконаладочные работы по собственно реакторной установке как наиболее сложной и ответственной части.

Однако недостатки второго варианта могут быть в значительной степени устранены, если конструкция опытно-промышленного образца позволит производить поэтапную отработку прототипа. С этой целью в качестве опытно-промышленного образца установки может

быть предложена установка, получаемая в которой тепловая энергия будет использоваться для выработки электрической энергии в турбогенераторе и в химико-технологическом комплексе для производства водорода.

Для осуществления химико-технологического процесса получения водорода температура теплоносителя первого контура на выходе из реактора должна составлять 900–950 °С. Пар высоких параметров генерируется в парогенераторе при температуре на входе первого контура 750 °С. Изготовление и отработку такой установки можно вести в три этапа.

На первом этапе, не дожидаясь разработки и изготовления теплообменников, отработки топлива на высокую температуру, а также не выполняя монтажа оборудования химического комплекса, можно приступить, путем установки перепускных труб вместо теплообменника, к отработке установки на уровне температуры до 750 °С с выработкой электроэнергии в паротурбинном цикле. Максимальная мощность реактора в этом режиме составит 70 % $W_{\text{ном}}$. Расход теплоносителя первого контура, все параметры парогенератора и газодувки будут номинальные.

На втором этапе при том же составе оборудования, что и на первом, возможно осуществить подъем температуры на выходе из зоны до 950 °С, при этом в парогенераторах будет сохраняться прежний уровень температуры за счет разбавления горячего теплоносителя, поступающего из зоны, холодным, подаваемым с напорной ветки газодувки с помощью байпаса.

На третьем этапе после изготовления и монтажа промежуточного теплообменника и всего химико-технологического оборудования и завершения пусконаладочных работ по реакторной установке можно приступить к отработке всего комплекса и выходу на проектную мощность.

Схема установки с комплексным способом производства тепловой энергии и электроэнергии представляется наиболее оптимальным решением при выборе опытно-промышленного образца установки с высокотемпературным гелиевым реактором на тепловых нейтронах. Этот образец обладает хорошей прототипностью относительно наиболее перспективных энерготехнологических установок, а конструкция оборудования и схема установки до пускают необходимую этапность в изготовлении и эксплуатации образца.

Высокотемпературный газоохлаждаемый реактор – экологически чистый и безопасный энергоисточник для комплексного энергообеспечения промышленных объектов¹

Эксплуатируемые в настоящее время атомные станции с легководными реакторами используются в основном для производства электроэнергии. В то же время потенциальные потребности «неэлектрического» применения ядерной энергии, в том числе взамен энергии, получаемой в результате сжигания органического топлива, для теплоснабжения бытовых и промышленных потребителей превышают возможности атомной электроэнергетики.

Радикальное решение вопроса замещения органического топлива ядерным для производства тепловой энергии различного потенциала возможно при условии создания ядерных установок нового поколения, способных обеспечить комплексное энергоснабжение широкого круга промышленных и коммунальных потребителей и обладающих свойствами, позволяющими ограничить последствия любых аварий территорией станции.

К числу признанных перспективными типов реакторов относятся высокотемпературные газоохлаждаемые реакторы (ВТГР), концепцией которых предусматривается всемерное использование свойств внутренней самозащищенности, применение пассивных самодействующих систем безопасности, осуществление принципов глубоководной физической и функциональной защиты реактора.

На рисунке приведена схема, характеризующая возможные области использования тепловой энергии ВТГР. Как видно из схемы, высокий потенциал вырабатываемой тепловой энергии позволяет получать энергоносители, по уровню температуры соответствующие получаемым в традиционной тепловой энергетике, и обеспечивает возможность производства электроэнергии с высоким КПД, в том

¹ Журнал «Энергетическое строительство», № 1, 1994, с. 39–41. Авторы: Ф.М. Митенков, В.В. Булыгин, Н.Г. Кодочигов.

числе и при реализации замкнутого газотурбинного цикла. Заполнение активной зоны реактора шаровыми твэлами создает предпосылки для организации на базе ВТГР энергорadiационных производств, относящихся к перспективным технологиям. Масштабы внедрения ВТГР, целесообразность создания на их основе атомных энерготехнологических станций будут определяться их конкурентоспособностью по сравнению с альтернативными источниками энергоснабжения в каждой конкретной отрасли промышленности. При сравнительной оценке энергоисточников для каждого из них должны учитываться затраты на природоохранные мероприятия и компенсацию ущерба от загрязнения окружающей среды, экономический эффект от экономии органического топлива как сырья для производства химической продукции.

Ориентируясь на существующие разработки ВТГР различной мощности, учитывая значительную общность проблем, требующих проведения НИОКР и ускорения их выполнения (при минимуме финансовых затрат и технического риска), а также большую совместимость ВТГР с существующими промышленными производствами, в качестве первого этапа их освоения признано целесообразным создание демонстрационной опытно-промышленной установки малой мощности (ВГМ), предназначенной для отработки комплекса научных и инженерных задач, связанных с освоением оборудования и систем для выработки и передачи высокопотенциальной теплоты, и подтверждения повышенных характеристик безопасности.



Области использования тепловой энергии ВТГР

Основу концепции проекта ВГМ составляют следующие положения: многоцелевое назначение, то есть обеспечение возможности получения тепловой энергии высокого потенциала (до 950 °С) и пара с параметрами, соответствующими принятым в традиционной тепловой энергетике (давление до 17,2 МПа и температура до 540 °С);

- двухэтапное достижение проектного уровня температуры, что позволит ускорить промышленное внедрение установок с температурой теплоносителя на выходе из первого контура до 750 °С;
- применение в качестве теплоносителя первого контура инертного газа (гелия), обладающего радиационной и термической стойкостью и практически неактивируемого в нейтронном потоке;
- трехконтурная система передачи высокопотенциальной теплоты потребителю, предполагающая наличие двух стенок между теплоносителем первого контура и конечным технологическим продуктом, что практически исключает взаимные перетечки активности и технологических сред;
- использование для изготовления элементов активной зоны (АЗ) керамических материалов, исключающих ее плавление в любых аварийных ситуациях;
- применение малоразмерных топливных частиц (микротвэлов), каждая из которых имеет многослойное покрытие, что позволяет ограничить возможную область повреждения АЗ в случае гипотетических аварий только «горячим пятном» зоны и снизить суммарное выделение активности;
- многобарьерная «защита в глубину» в совокупности с внутренней самозащищенностью и защитными системами и устройствами пассивного принципа действия, исключающие необходимость вмешательства операторов и распространение радиоактивных продуктов за пределы территории станции при любых авариях;
- перегрузка «насыпной» активной зоны при работе реактора под нагрузкой, что увеличивает коэффициент использования мощности и снижает активность, запасенную в первом контуре;
- реализация принципа «холодный» корпус, что повышает надежность одного из основных барьеров на пути распространения радиоактивных веществ;
- использование шаровых твэлов. главной циркуляционной газодувки, парогенератора, высокотемпературного теплообменника, исполнительного механизма СУЗ и т.п., разработанных для более мощной многопетлевой установки, что обеспечивает представительную отработку основного оборудования для создания мощностного ряда установок этого типа.

Основные (расчетные) характеристики установки ВГМ на первом и втором этапах опытно-промышленного освоения приведены в таблице.

Таблица

Основные (расчетные) характеристики установки ВГМ

Показатель	Первый этап	Второй этап
Тепловая мощность реактора, МВт	200	200
Тепловая мощность, передаваемая в промежуточный гелиевый контур, МВт	-	76,9
Тепловая мощность парогенератора первого контура, МВт	203,5	124,3
Параметры теплоносителя первого контура		
Температура гелия, °С:		
на входе в активную зону	300	300
на выходе из активной зоны	750	750
Давление гелия, МПа	5,0	5,0
Параметры генерируемого пара		
Давление, МПа	17,2	17,2
Температура, °С	450	540
Параметры теплоносителя (гелия) промежуточного контура		
Температура на выходе из теплообменника, °С	-	900
Давление, МПа	-	5,2
Активная зона		
Габариты (высота/диаметр), мм	9400/3000	
Средняя энергонапряженность, МВт/м ³	3	
Степень обогащения топлива по ²³⁵ U, %	8	
Среднее выгорание топлива, ГВт·сут/т	76,0	
Средняя кампания, сут	950	
Назначенный срок службы, лет	40	

Проектом однореакторной опытно-промышленной установки ВГМ, предусматривается одна основная петля теплоотвода и одна вспомогательная. Основное оборудование обеих петель размещается в металлическом блоке корпусов, состоящем из корпуса реактора, корпусов теплообменного оборудования и соединительного патрубка. Геометрические размеры и форма активной зоны, а соответственно, корпуса реактора выбраны из условия установки исполнительных

органов системы управления в каналах бокового отражателя и теплоотвода от реактора через боковую поверхность корпуса к поверхностному теплообменнику, размещенному вне первого контура. Интенсивность теплоотвода через корпус реактора при сниженном до атмосферного давлении теплоносителя и отсутствии принудительной и организованной естественной циркуляции достаточна для сохранения температуры элементов АЗ и топлива в допустимых пределах. Наряду со стержнями-поглотителями реактор оснащен системой компенсации реактивности, функции которой исполняют мелкие шарики с поглотителем, попадающие в АЗ (как и стержни-поглотители) через отверстия в отражателе под действием силы тяжести.

Теплообменное оборудование и главная циркуляционная газодувка размещены в отдельном корпусе, соединенном с корпусом реактора патрубком. Высокотемпературный теплообменник расположен в центральной части внутри кольцевого парогенератора, а газодувка в нижней части корпуса. Нижнее расположение соединительного патрубка исключает естественную циркуляцию по первому контуру и нежелательный перенос теплоты высокого потенциала к несущим металлоконструкциям при теплоотводе через поверхностный теплообменник. Для перегрузки шаровых тепловыделяющих элементов, которая осуществляется при работающем реакторе, используется система шлюзов для свежего и отработавшего топлива, благодаря чему при выполнении операций по замене топлива сохраняются требуемые параметры теплоносителя первого контура. Предусмотренная система загрузки-выгрузки топлива позволяет возвратить в реактор недовыгоревшие твэлы.

Реализация принятых в проекте ВГМ схемно-конструкционных решений обеспечивает наличие на пути распространения радиоактивных продуктов нескольких защитных барьеров, а выбранные параметры теплоносителей и условия работы оборудования — сохранность этих барьеров во всех эксплуатационных режимах.

К числу особенностей ВГМ относятся большая теплоаккумулирующая способность компонентов АЗ, обуславливающая плавное изменение параметров среды при любых изменениях режима работы, а также отрицательное значение температурного и мощностного коэффициентов реактивности во всем диапазоне эксплуатационных мощностей.

В результате многолетней работы коллективов ОКБ Машиностроения, ИАЭ им. И.В. Курчатова, ВНИПИЭТ и других предприятий и организаций к настоящему времени создана научно-техническая база для разработки проекта промышленной РУ с газоохлаждаемым высокотемпературным реактором; подтверждена возможность

использования для ВТГР действующей нормативно-технической документации для ядерно-энергетических объектов; разработаны и согласованы с базовыми институтами и надзорными органами «Основные положения обеспечения безопасности опытно-промышленной установки ВГМ».

Создан экспериментальный комплекс, обеспечивающий возможность проведения основного объема работ по отработке специфических для ВТГР элементов оборудования, и выполнена большая программа испытаний, результаты которых позволяют говорить о технической готовности к разработке проектов промышленных установок на температурный уровень до 800 °С.

Одновременно ведется поиск действующих производств для начального промышленного использования ВТГР. Основными критериями при этом являются экономическая целесообразность и минимальное изменение структуры производства. На основе технических требований нефтеперерабатывающей отрасли разработаны проекты блока основного оборудования и трехблочной реакторной установки тепловой мощностью 645 МВт для комплексного энергообеспечения типового нефтеперерабатывающего завода.

Следует отметить важную роль создания ядерных энерготехнологических комплексов, особенно для наиболее энергоемких отраслей промышленности, в решении задачи экономии и рационального использования органического топлива. В перспективе можно ожидать увеличения экономической эффективности сооружения ядерных энергоисточников по сравнению с имеющимися оценками в связи с наблюдающимся значительным ростом цен на органическое топливо, а также технической целесообразности их расширенного внедрения еще и по причине уменьшения зависимости энергоснабжения промышленных и бытовых потребителей от объемов добычи, задержек с поставкой и конъюнктуры цен на топливо.

Таким образом, концепция высокотемпературных газоохлаждаемых реакторов относится к числу новых реакторных технологий, наиболее подготовленных к промышленному освоению. ВТГР предоставляют возможность обеспечить пользователя теплотой высокого потенциала и получать энергоносители с температурами, соответствующими принятым в традиционной энергетике. Это свойство ВТГР в совокупности с его предельной безопасностью позволяет рассматривать станции на их основе как возможную альтернативу существующим ТЭЦ на органическом топливе.

Судовые реакторные установки

Перспективы использования судовых реакторных установок¹

К настоящему времени в нашей стране накоплен большой опыт практического использования корабельных ЯЭУ. Достаточно сказать, что суда ледокольного плавания с ЯЭУ успешно эксплуатируются уже более 30 лет. Общая наработка девяти таких судов составляет более 150 реакторо-лет. Поэтому естественно стремление рассмотреть целесообразность использования положительно зарекомендовавших себя судовых установок в других областях экономики. При этом необходимо учитывать исходные положения, которые по существу очевидны и не требуют дополнительного обоснования. Во-первых, судовые ЯЭУ при использовании их на АЭС требуют доработки, что диктуется спецификой назначения и условий применения, а также соответствующими требованиями нормативных документов. Во-вторых, их мощность по сравнению с базовыми энергоблоками АЭС намного меньше. Поэтому по удельным экономическим характеристикам они, конечно, не могут конкурировать со стационарными АЭС. Однако существует значительный рынок потенциальных энергопотребителей в регионах, лишенных энергетических сетей и автономных энергоисточников необходимой мощности с приемлемыми технико-экономическими характеристиками. Для таких регионов, перспективных с точки зрения коммерческого освоения, судовые ЯЭУ могут представлять значительный интерес.

В ОКБМ (г. Нижний Новгород) с участием ЦКБ «Айсберг» и ЦКБ «Балтсудопроект» (г. Санкт-Петербург) выполнены исследования и соответствующие проектные разработки, имеющие целью подтвердить

¹ Журнал «Атомная энергия», т. 76, вып. 4, апрель 1994, с.318–326.
Автор – Митенков Ф.М. Печатается с сокращениями

техническую возможность и целесообразность использования судовых ЯЭУ для энергоснабжения наземных потребителей.

Основные характеристики энергоустановок, на которые ориентировались при проведении этих исследований, следующие:

Наименование параметра	КЛТ-40	КН-3
Тепловая мощность реактора, МВт	170	300
Давление в реакторе, МПа	12,8	14,6
Температура теплоносителя, °С		
на входе в активную зону	277	274
на выходе из активной зоны	320	322
Паропроизводительность, т/ч	240	400
Параметры пара:		
температура, °С	305	295
давление за парогенератором, МПа	3,1	4,0
Температура питательной воды, °С	104-108	194
Электрическая мощность, МВт	50	90

Конструкция судовых установок КЛТ-40 хорошо известна. Поэтому целесообразно напомнить только те особенности, которые существенны с точки зрения их использования на АЭС. При этом необходимо иметь в виду, что излагаемые соображения в равной степени относятся и к реакторной установке КН-3. Для конкретности приводимые количественные характеристики отнесены к КЛТ-40.

В первую очередь необходимо отметить высокую надежность оборудования и систем ЯЭУ, подтвержденную успешной безаварийной многолетней эксплуатацией атомных ледоколов. Известно, что эксплуатация ледоколов характеризуется особо тяжелыми условиями. От ЯЭУ в таких условиях требуются высокая маневренность с частыми и глубокими изменениями мощности с относительно большой скоростью, устойчивость к виброударным нагрузкам, значительным термоциклическим нагружениям основного оборудования и др. За время многолетней эксплуатации КЛТ-40 не было отмечено ни одного инцидента с нарушением управления реакцией деления или неконтролируемого распространения радиоактивности. Проектные ресурсные характеристики основного оборудования были многократно превышены.

Ревизия оборудования атомного ледокола «Ленин», выведенного из эксплуатации вследствие износа корпуса, показала, что основное оборудование после 110 тыс. часов работы сохранило работоспособность.

Есть основания считать, что режимы эксплуатации в составе АЭС (даже автономных) для реакторной установки в целом будут более стабильными, следовательно, и более легкими, щадящими с точки зрения ресурса оборудования.

Реакторная установка и обслуживающие ее системы заключены в защитную оболочку, удовлетворяющую требованиям герметичности и рассчитанную на внутреннее давление 0,4 МПа. При этом утечка радиоактивности в окружающее пространство не превышает 1% в сутки, что позволяет исключить недопустимые выбросы при разгерметизации первого контура. Конструкция защитной оболочки обеспечивает непробиваемость летящими предметами в случае запроектных аварий. По уровню безопасности КЛТ-40 удовлетворяет современным требованиям нормативных документов для судовых установок, а также ПБЯ РУ АС-89.

Основу реализованной концепции безопасности составляют:

- внутренняя самозащищенность реактора за счет отрицательных температурных обратных связей;
- система аварийной защиты, обеспечивающая остановку реактора рабочими органами без использования внешних источников энергии (пассивная защита);
- глубокоэшелонированная защита;
- резервирование оборудования, важного для безопасности;
- пассивная система аварийного расхолаживания с использованием естественной циркуляции во всех контурах передачи тепловой энергии от активной зоны до конечного поглотителя;
- система мероприятий по предупреждению эксплуатационных аварий.

Глубокоэшелонированная система защиты представляет комплекс барьеров на пути возможного выхода и распространения радиоактивных продуктов деления: топливная композиция, оболочка твэлов, герметичный контур теплоносителя реактора, защитная оболочка, защитное ограждение. Неотъемлемым дополнением является система контроля радиоактивности в реакторном и примыкающих помещениях.

Числовые оценки с использованием консервативных допущений показывают, что проектными решениями обеспечивается вероятность превышения пределов безопасности $2 \cdot 10^{-6}$ год⁻¹, что значительно меньше величины 10^{-5} год⁻¹, считающейся приемлемой согласно ОПБ-88.

Исследования проектных аварий, то есть аварий, характеризующихся единичными отказами в системах безопасности или единичными ошибками эксплуатационного персонала, подтверждают отсутствие повреждений в активной зоне, а также радиационных последствий.

Длительный опыт эксплуатации атомных судов подтвердил высокий уровень их радиационной безопасности. Среднегодовая дозовая нагрузка на персонал по опыту работы судов с реакторной установкой КЛТ-40 составляет менее 0,5 бэр, что существенно ниже санитарных норм. Радиационное воздействие на окружающую среду при нормальной эксплуатации таких судов отсутствует. Предусмотренный комплекс защитных барьеров и систем безопасности исключает возможность недопустимых воздействий на окружающую среду даже при постулируемых авариях, сопровождающихся плавлением активной зоны реактора.

Выполнены исследования по проектам плавучей АЭС, плавучей атомной водоопреснительной станции, плавучего комплекса для производства электроэнергии и опресненной воды, стационарной АЭС в наплавном и подземном вариантах. Важнейшими экономическими факторами, общими для всех перечисленных типов станций, являются:

- использование реакторной установки серийного производства;
- строительство станции «под ключ» или в большой степени готовности в условиях судостроительного завода;
- возможность параллельного выполнения работ по сооружению самой плавучей АС на заводе и необходимых береговых сооружений на месте базирования станции;
- упрощение сейсмической защиты;
- простота и минимальные затраты по снятию АС с эксплуатации и доведению места стоянки до состояния «зеленой лужайки»;
- высокое качество работ, обусловленное заводской системой контроля технологических операций;
- *сокращение сроков сооружения до 3–4 лет;*
- сокращение финансовых затрат на сооружение, обусловленное уменьшением кредитных средств, лучшей организации труда.

Плавучая АЭС. Такие энергоисточники представляют интерес для прибрежных, особенно труднодоступных и удаленных регионов. В нашей стране это районы Восточной и Северо-Восточной Сибири, Дальнего Востока, Камчатки, характеризующиеся большой сетью полноводных рек, доступностью со стороны Северного Ледовитого и Тихого океанов, наличием больших запасов минеральных ресурсов.

Плавучая АЭС представляет собой специальное самоходное судно, предназначенное для выработки электроэнергии в условиях защищенной акватории. Проработаны два варианта: с двумя и с одной реакторными установками. В обоих случаях схемно-конструкционные решения станции позволяют производить электрическую и тепловую энергию для отопления или технологических целей, опреснять воду

в различных соотношениях (при сохранении номинальной мощности реакторов).

В основу энергетической системы плавучей АЭС положен принцип моноблока: реактор—турбина—генератор—линия электропередачи.

Следует иметь в виду, что в течение общего срока службы 40 лет предусматривается температурный отжиг корпуса реактора для восстановления механических свойств материала, изменение которых вызывается нейтронным облучением в процессе эксплуатации.

Атомная плавучая водоопреснительная станция (АПВС-80) — специальное несамходное судно с ядерной двухреакторной установкой КЛТ-40, предназначенное для опреснения морской воды. Работает в условиях защищенной акватории. Судно укомплектовано дистилляционными опреснительными установками с горизонтально-трубными пленочными аппаратами и установкой приготовления питьевой воды из термически опресненной.

Основные характеристики АПВС-80 с двумя реакторными и четырьмя опреснительными установками следующие:

Длина судна, м	160
Ширина, м	44
Осадка, м	7
Производительность по опресненной воде, кг/сут	80000
Общий срок службы, год	25
Срок службы РУ КЛТ-40, лет	40
Коэффициент нагрузки	0,85
Численность эксплуатационного персонала, чел.	60

Надежная и эффективная технологическая схема опреснительной установки обеспечивает приготовление физиологически полноценной питьевой воды высокого качества, отвечающей требованиям Всемирной организации здравоохранения.

Опасность влияния излучения на процесс опреснения и качество опресненной воды исключено, поскольку используется трехконтурная схема ее получения, при которой между первым контуром реакторной установки и технологическим контуром опреснения располагается строго контролируемый промежуточный контур.

Выбор оптимальной технологии опреснения, организация приема и сброса морской воды, наличие экологического блока переработки бытовых отходов исключают влияние станции на окружающую среду.

Стационарные АЭС. Применение судовых реакторных установок, в частности, КЛТ-40, в составе наземных АЭС в некоторых случаях также представляется перспективным. В концептуальном плане

проработаны три варианта стационарных АЭС: наземные, подземные и наплавные. За счет более развитой и экономичной тепловой схемы эффективность наземной АЭС существенно повышается.

Подземная АЭС. Как известно, среди специалистов обсуждается целесообразность сооружения подземных АЭС. В пользу таких станций высказывался академик А.Д.Сахаров, который приводил при этом некоторые аргументы психологического характера. Если это направление получит развитие, то использование установок КЛТ-40 с их минимальными массогабаритными характеристиками может оказаться привлекательным. Разработки показывают, что для размещения АЭС с двумя блоками КЛТ-40 необходима подземная выработка размерами 25 x 30 x 100 м. При этом предполагается, что основные технологические операции, включая операции с радиоактивными отходами, будут также проводиться под землей.

Наплавная АЭС. Наплавной способ сооружения позволяет существенно рационализировать транспортно-строительные операции при возведении АЭС в регионах, примыкающих к морским побережьям или крупным судоходным рекам. В этом случае сохраняются в значительной степени те достоинства, которые отмечались для плавучих АЭС. Действительно, для станций, сооружаемых наплавным методом, может быть обеспечено серийное изготовление крупных монтажных блоков оборудования, прошедших полный заводской контроль качества, и поставка их к месту строительства водным путем. Так, реакторная установка с обеспечивающими системами в защитной оболочке может составлять обладающий временной плавучестью энергетический блок-модуль, который транспортируется по открытой акватории от судостроительного завода к площадке строящейся станции на полупогружных судах типа «Траншельф». Аналогичным образом на строительную площадку могут быть поставлены паротурбинный и электроэнергетический блоки с обеспечивающими их работу системами. Возможность параллельной работы по изготовлению блоков оборудования на заводах и строительству береговых сооружений сократит сроки ввода АЭС.

Таким образом, применение судовых реакторных установок технически оправдано и может представлять экономический интерес в составе автономных энергоисточников различного исполнения и назначения. Отличительной особенностью таких энергоисточников является максимальное использование заводской технологии и заводских условий сооружения, что обеспечивает высокое качество, значительное сокращение сроков и финансовых затрат.

О перспективах развития судовых ЯЭУ

Уже на самом раннем этапе становления атомной энергетики в ряде стран начались интенсивные исследования и проектные разработки, имевшие целью создание эффективного ядерного источника энергии для подводных лодок и надводных судов. Большая заинтересованность в решении этой проблемы объяснялась тем, что ее успешное решение позволяло обеспечить неограниченную дальность плавания судов, практически полную их автономность по энергообеспечению, поскольку разовая загрузка реакторов ядерным топливом может обеспечить многолетнюю эксплуатацию судна без повторной заправки.

Эта потенциальная возможность атомной энергетики представлялась особенно важной для судов военного назначения, в первую очередь, для подводных лодок. Первые разработки судовых ядерных энергетических установок (ЯЭУ) в СССР, США, Великобритании, Франции проводились с ориентацией использования их именно на подводных лодках.

Интенсивные исследования и разработки позволили относительно быстро обосновать основополагающие решения для создания судовой ЯЭУ, а именно: принципиальную схему, состав и структуру, тип реактора, вид теплоносителя и замедлителя в реакторе, конструкцию основного оборудования, требования к системе управления.

На первых стадиях исследований и проектных разработок рассматривались и экспериментально отработывались три теплоносителя в реакторе: вода, натрий, эвтектический сплав свинец-висмут. Однако после представительных исследований и опробований разработчики указанных выше стран отдали предпочтение воде, которая в реакторе используется и в качестве теплоносителя, и как замедлитель нейтронов.

Многолетняя эксплуатация судов с ЯЭУ подтвердила, в основном, правильность решений, принятых на начальной стадии их создания, но одновременно выявила довольно много недостатков и неоптимальных решений как в схемах, так и в конструкции различного оборудования. Устранение выявленных недостатков ЯЭУ велось успешно в последующих проектах, что позволило резко увеличить надежность судовых ЯЭУ, находящихся в эксплуатации в настоящее время.

Опыт, полученный при создании ЯЭУ для подводных лодок, позволил развернуть работы по созданию ЯЭУ для гражданских судов, технические требования к которым определялись их назначением.

В СССР с 1954 г. велась разработка ЯЭУ для мощного ледокола «Ленин», в США — для торгового судна «Саванна». Позднее в Германии была создана ЯЭУ для рудовоза «Отто Ганн», а в Японии — для экспериментального судна «Муцу».

Многолетний отечественный опыт использования атомных ледоколов не оставляет сомнений в достаточности технических и производственных возможностей для широкого использования атомной энергетики на гражданских судах. Необходимыми условиями для этого являются:

- разработка международных правовых нормативов, регламентирующих создание и эксплуатацию судов с ядерной энергетикой;
- создание эффективной инфраструктуры для обслуживания таких судов;
- обоснование условий и требований к ЯЭУ, выполнение которых обеспечит не только конкурентоспособность по эксплуатационным и технико-экономическим характеристикам, но и существенные дополнительные преимущества по отношению к судам на органическом топливе.

Технико-экономическая оптимизация ЯЭУ для гражданских судов, безусловно, должна проводиться с учетом указанных условий.

Накопленный проектный, производственный и эксплуатационный опыт позволяет в настоящее время сформулировать основные положения, которые следует учитывать при выборе направлений дальнейшего развития судовых ЯЭУ и при прогнозировании перспективных характеристик их на будущее.

Имеются все основания утверждать, что на ближайшие десятилетия развитие судовых ЯЭУ будет проводиться на основе реакторов с водой под давлением в качестве теплоносителя-замедлителя. Совершенствование ЯЭУ с такими реакторами позволит дополнительно улучшить технико-экономические характеристики, поскольку потенциальные возможности ЯЭУ такого типа далеко не исчерпаны.

Однако следует иметь в виду, что в процессе развития судовых ЯЭУ возможно появление новых технических идей, материалов, технологий и др., которые сделают оправданным использование новых типов реакторов и других теплоносителей, имеющих определенные преимущества по сравнению с водой по теплофизическим характеристикам, которые при определенных условиях позволят улучшить те или иные технические или экономические характеристики.

Выбор направлений совершенствования судовых ЯЭУ независимо от назначения опирается на всесторонний анализ пройденных этапов развития ЯЭУ для подводных лодок, надводных кораблей, атомных ледоколов. При этом анализируется и опыт проектирования,

изготовления, монтажа, эксплуатации, профилактического ремонтного обслуживания.

Такой анализ позволяет выделить наметившиеся прогрессивные тенденции в компоновках оборудования ЯЭУ, требованиях к основному оборудованию, энергозапасу реакторов, к системам управления ЯЭУ и др.

Для судовых ЯЭУ компоновочные решения реакторной установки (РУ) имеют определяющее значение, поскольку значительная часть характеристик, в частности: уровень безопасности, масса, габариты, ремонтпригодность, конструкция основного оборудования, — в значительной степени зависит от вида компоновки.

Реакторные установки первого поколения отличает большая разветвленность первого контура, обусловленная так называемой петлевой компоновкой оборудования РУ, при которой к каждому виду оборудования подходит, по меньшей мере, два трубопровода (подводящий и отводящий).

На реакторных установках второго поколения разветвленность первого контура существенно уменьшена за счет блочной компоновки, при которой основное оборудование (парогенераторы, насосы и др.) размещается непосредственно на корпусе реактора посредством патрубочного соединения «труба в трубе».

Однако и в блочной компоновке часть обеспечивающего оборудования РУ (компенсатор давления, фильтры, холодильники и др.) подключена к первому контуру РУ относительно протяженными трубопроводами. Дальнейшее увеличение степени локализации теплоносителя первого контура достигается при использовании интегральной конструкции реактора. Отличительной ее особенностью является размещение теплообменной поверхности парогенераторов в одном корпусе с активной зоной реактора, а насосные агрегаты монтируются либо на крышке реактора, либо внутри корпуса реактора, либо на коротких патрубках корпуса реактора. В интегральном реакторе может быть достигнута максимальная локализация теплоносителя первого контура в одном объеме. Показательным примером такой компоновки является реакторная установка рудовоза «Отто Ганн».

Если в установках «Рубис» и российской установке малой мощности, где используется также интегральный реактор, компенсатор давления вынесен за пределы корпуса реактора, то в установке рудовоза «Отто Ганн» используется встроенная паровая система компенсации давления, то есть является составной частью интегрального реактора. Аналогичные решения использованы в проектах интегрального реактора США, России, но с парогазовой компенсацией.

Предпочтительность интегральной компоновки РУ в отношении снижения опасности разгерметизации первого контура при прочих равных условиях очевидна, что, безусловно, должно учитываться проектантом ЯЭУ при решении вопросов обеспечения радиационной безопасности.

Следует заметить, что аналогичный путь развития претерпели реакторные установки стационарных АЭС с кипящими реакторами, наметились соответствующие тенденции и в установках типа ВВЭР (проекты АСТ-500, АТЭЦ-200, ВПБЭР-600).

Известные конструктивные схемы интегральных реакторов не исчерпывают дальнейшего их развития, совершенствования. Оно связано с выбором типа и оптимизацией размещения системы компенсации давления, циркуляторов теплоносителя, уровнемеров, рабочих органов управления и защиты, а также с решением вопросов перезарядки реактора, ремонтпригодности.

Несмотря на большую значимость компоновочных решений реакторной установки для судовых ЯЭУ, их совершенствование не может быть самодовлеющим, поскольку необходимо стремиться к оптимальному обеспечению всей совокупности характеристик ЯЭУ в целом, определяющих ее эффективность.

Имеются достаточные основания считать, что дальнейшее совершенствование судовых ЯЭУ с водо-водяными реакторами будет определяться следующими техническими характеристиками:

- гарантируемый уровень безопасности ЯЭУ;
- ресурсная надежность составляющих систем, оборудования;
- простота конструкции;
- простота управления и эксплуатационного обслуживания;
- ремонтпригодность;
- сокращение числа перезарядок реактора за время жизни судна;
- безопасность для окружающей среды;
- состав, сложность и стоимость инфраструктуры для обслуживания судов с ЯЭУ;
- численность эксплуатационного персонала.

Перечисленные характеристики в совокупности с экономическими (затратными) показателями будут определять перспективность вновь создаваемых ЯЭУ, а для гражданских судов и конкурентоспособность.

Хотя накопленный к настоящему времени опыт свидетельствует о достаточно высоком уровне ядерной и радиационной безопасности судовых ЯЭУ, следует исходить из того, что повышение уровня их гарантированной безопасности должно и впредь оставаться в центре внимания проектанта.

Применительно к стационарным АЭС международное сообщество ученых и специалистов под эгидой МАГАТЭ выработало принципиальные положения обеспечения их безопасности, которые легли в основу национальных нормативов. Для судовых ЯЭУ характерны существенные особенности, обусловленные их назначением и спецификой условий их использования. Эти особенности, несомненно, должны учитываться и при решениях вопросов безопасности. Однако отправляться при этом целесообразно от нормативов, установленных для стационарных АЭС.

Учитывая жесткие ограничения по массогабаритным характеристикам для судовых ЯЭУ, обоснованный выбор оптимальных технических решений, затрагивающих вопросы безопасности, возможен только при системном анализе технически возможных аварийных ситуаций с оценкой вероятности их реализации.

Принято делить аварии на *проектные* и *запроектные*. К проектным относят те аварии, которые реализуются при единичном отказе какого-либо оборудования или другом аномальном событии, влияющем на нормальную работу ЯЭУ. Возникновение запроектных аварий связывается с наложением двух и более аномальных событий, нарушающих работоспособность ЯЭУ. Таким образом, проектные и запроектные аварии принципиально различаются вероятностью их реализации.

При проектных авариях работоспособность ЯЭУ должна обеспечиваться хотя бы при сниженных эксплуатационных параметрах. При запроектных авариях утрата работоспособности ЯЭУ не исключается, но их последствия для эксплуатационного персонала и окружающей среды не должны выходить за пределы, оговоренные санитарно-гигиеническими нормами для аварийных условий.

Рекомендации МАГАТЭ для стационарных АЭС предусматривают рассмотрение так называемой постулированной (гипотетической) аварии, сопровождающейся расплавлением активной зоны, если технические решения ЯЭУ не исключают перегрева твэлов до расплавления при отказе всех проектных технических средств теплоотвода в реакторе. Если расплавление активной зоны не исключается, то согласно рекомендациям МАГАТЭ проектом должны быть предусмотрены пассивные защитные средства за пределами реактора, которые исключают недопустимое воздействие на окружающую среду.

При выполнении в проекте ЯЭУ условий, вытекающих из требований МАГАТЭ к постулированной аварии, исследование запроектных аварий, вообще говоря, может ограничиваться подтверждением того, что их последствия для эксплуатационного персонала и окружающей среды не превышают установленных аварийных пределов. Но не следует исключать целесообразность поиска таких технических решений,

которые бы сохраняли возможность восстановления работоспособности ЯЭУ хотя бы после некоторых запроектных аварий. Только в тех случаях, когда запроектная авария для существенного ограничения последствий, с точки зрения последующего восстановления работоспособности ЯЭУ, требует таких дополнительных технических мероприятий, которые либо недопустимо усложняют установку, либо ухудшают ее эксплуатационные характеристики при проектных режимах, будет оправдана ориентация на предельное состояние ЯЭУ без последующего восстановления работоспособности.

Из изложенного следует, что обеспечение высокого уровня безопасности и оптимальных проектных решений в целом возможно только при системном подходе с учетом всех требований и условий на всех этапах проектирования.

Здесь следует отметить большие потенциальные возможности повышения уровня безопасности при интегральной компоновке РУ по сравнению с другими компоновочными вариантами, поскольку при интегральной компоновке резко снижается вероятность разгерметизации первого контура, улучшаются возможности для реализации проектных решений по обеспечению расхолаживания реактора в различных аварийных ситуациях.

После безопасности ресурсная надежность систем и оборудования ЯЭУ является важнейшей характеристикой, поскольку она в основном определяет эксплуатационные, а следовательно, в значительной степени и технико-экономические характеристики ЯЭУ.

Достигнутые значения ресурсных показателей основного оборудования судовых ЯЭУ уже впечатляют. Так, ревизия главных циркуляционных насосов ЯЭУ атомного ледокола «Ленин» показала, что после работы в течение более 110 тыс. часов они полностью сохранили работоспособность. В частности, на подшипниковых опорах не выявлено заметного износа; электрические, механические и гидравлические характеристики сохранили свои проектные значения. То же состояние зарегистрировано для приводов органов управления и защиты, для арматуры. Металловедческие исследования главных патрубков реактора, соединяющих его с парогенераторами и насосами, также не выявили каких-либо развивающихся дефектов.

На действующем атомном ледоколе «Арктика» достигнутый ресурс реакторной установки превышает 150 тыс. часов, и обоснована возможность продления ресурса до 170 тыс. часов.

В парогенераторах судовых ЯЭУ на критическом пути всегда была теплообменная поверхность. Сложные условия ее работы, большое число воздействующих разнообразных факторов, влияющих на ее работоспособность, определяют и конструкцию парогенератора,

и выбор материалов теплообменной поверхности. К настоящему времени эти задачи нашли успешное решение в рамках действующих требований. Эффективность решений подтверждена многолетней эксплуатацией большого числа парогенераторов в штатных условиях. В качестве материала теплообменной поверхности для прямоточных парогенераторов наиболее надежными оказались титановые сплавы.

Увеличение ресурса парогенераторов по сравнению с достигнутым возможно при дальнейшем углубленном изучении механизмов накопления повреждений, обусловленных термомеханическими, физико-химическими процессами, что позволит при необходимости внести корректировки в конструкцию и требования к материалу теплообменной поверхности.

Корпус реактора при работе подвергается воздействию факторов различной физической природы, изменяющихся в процессе эксплуатации. Однако исчерпание ресурса корпуса определяется обычно не термомеханическими нагрузками, а воздействием флюенса нейтронов на материал корпуса реактора и сварные швы в районе активной зоны. При облучении нейтронами существенно изменяются механические свойства материала корпуса и сварных швов, в частности, пластичность и критическая температура хрупкости.

Поэтому увеличение ресурса корпуса реактора при используемых в настоящее время материалах возможно за счет уменьшения потока нейтронов на корпус, что неизбежно связано с увеличением диаметра корпуса реактора, поскольку для этого необходимо увеличить поглощение нейтронов в радиальном зазоре между корпусом и активной зоной.

Некоторое увеличение ресурса корпуса достигается за счет введения в эксплуатационный регламент периодического отжига материала корпуса при температуре около 400 °С. Это, конечно, усложняет и конструкцию реактора, и его эксплуатацию. В интегральном реакторе поток нейтронов на корпус при прочих равных условиях на порядок и более снижен по сравнению с традиционным типом реактора, так как из-за размещения в едином корпусе теплообменной поверхности парогенератора и активной зоны неизбежно значительно увеличивается толщина слоя воды между корпусом реактора и активной зоной. В интегральном реакторе проблема достижения критического значения флюенса нейтронов на корпус практически снимается.

Нельзя не заметить, рассматривая проблему ресурсной надежности РУ, что в случае интегрального реактора существенно сокращается количество автономного оборудования первого контура, не включенного в интегральный реактор, что также способствует повышению безопасности и ресурсной надежности ЯЭУ. Обеспечивающие (вспомогательные) виды оборудования обычно не определяют ресурсных

характеристик для ЯЭУ, но при дальнейшем увеличении ресурса от достигнутого уровня необходимым условием обоснования его является корректный учет их модели эксплуатации с учетом проектных аварийных ситуаций, возможных термоциклических нагрузжений, обусловленных конструктивными особенностями, изменениями режимов работы, возможной нестабильностью параметров рабочих сред.

Необходимость дальнейшего улучшения ресурсных характеристик судовых ЯЭУ, включая и гарантируемый проектный ресурс, будет оставаться актуальной задачей в связи с возрастающими требованиями.

Поиск технических решений при этом будет проводиться по двум существенно различным направлениям:

- увеличение ресурса оборудования ЯЭУ за счет совершенствования конструкции и других технических мероприятий на стадии проектирования;
- внедрение системы контроля за расходом назначенного ресурса по всем видам оборудования, лимитирующим ресурс ЯЭУ в целом, с оценкой остаточного ресурса.

Значимость второго направления трудно переоценить, поскольку фактическая модель эксплуатации ЯЭУ может заметно отличаться от проектной, что, возможно, повлияет на проектные ресурсные характеристики некоторого оборудования.

Знания остаточного ресурса основного оборудования ЯЭУ в любой момент эксплуатации делает возможным, с одной стороны, избежать или сократить число аварийных ситуаций, обусловленных потерей работоспособности оборудования; с другой стороны, позволит наиболее полно использовать ресурсные возможности контролируемого оборудования, а следовательно, и ЯЭУ в целом. Возможность создания системы оперативного контроля ресурса оборудования в настоящее время имеет научное и техническое обоснование.

Планируется, что на строящемся новом атомном ледоколе «50 лет Победы» такая система будет введена в эксплуатацию.

Особо важное значение имеет ресурсная надежность активной зоны. Она определяется, в первую очередь, надежностью тепловыделяющих элементов (ТВЭЛОВ), которые должны оставаться герметичными в процессе всего срока эксплуатации, поскольку их разгерметизация приводит к недопустимому увеличению радиоактивности теплоносителя первого контура из-за попадания продуктов деления ядерного топлива.

При кажущейся простоте конструкции ТВЭЛОВ рабочие условия его оболочки характеризуются многообразием воздействующих факторов различной физической природы; для части из них характерна значительная неопределенность. Поэтому корректное обоснование гарантируемой надежности ТВЭЛОВ является весьма непростой задачей.

При этом сложность задачи растет с увеличением гарантируемого энергоресурса. Техничко-экономическая целесообразность увеличения энергоресурса твэлов и активной зоны в целом очевидна.

Действительно, при заданной полной энерговыработке ЯЭУ увеличение энергоресурса активной зоны имеет следствием уменьшение числа перезарядок реактора и, следовательно, сокращение простоя судна по причине замены отработавших активных зон на новые, уменьшение эксплуатационных расходов на обслуживание выгруженного топлива.

Кроме того, сокращение числа активных зон в необходимых для обеспечения проектной энерговыработки ЯЭУ за гарантируемый период эксплуатации приводит к соответствующему уменьшению суммарных затрат на их изготовление, поскольку затраты на изготовление при данной конструкции твэлов слабо зависят от энергоресурса активной зоны.

Поэтому при всей сложности задачи увеличения энергоресурса реактора научно-технические исследования и соответствующие разработки ведутся и будут продолжаться в целях оптимального энергообеспечения судов с учетом их назначения и обслуживающей инфраструктуры. Специалисты США поставили задачу создания реактора с энергоресурсом на весь срок службы подводной лодки.

Дальнейшее развитие судовых ЯЭУ неизбежно будет сопровождаться увеличением и усложнением оперативной информации, необходимой для надежной и уверенной эксплуатации ЯЭУ. С другой стороны, опыт создания сложных технических систем однозначно свидетельствует о необходимости поиска простых схемных и конструктивных решений. Не следует здесь видеть противоречия с высказанным ранее утверждением об увеличении и усложнении необходимой информации по мере развития судовых ЯЭУ. Напротив, именно получение этой информации и является необходимым условием упрощения схем и конструкций при одновременном увеличении ресурсной надежности ЯЭУ. Для этого должна быть предусмотрена специальная система, которая дает возможность оператору в процессе эксплуатации оперативно получать информацию о необходимых действиях по характерным признакам отклонений от проектных режимов работы.

Такая система фактически будет являться советчиком оператора, формулирующим оперативно и в удобной форме рекомендации строго в соответствии с эксплуатационной инструкцией и другой проектной документацией по ЯЭУ в целом. Наличие такой системы позволит эффективно преодолеть трудности, связанные с ростом объема информации, необходимой для эксплуатации перспективных ЯЭУ с прогрессивными технико-экономическими характеристиками, и тем самым будет способствовать созданию условий для упрощения схем

и конструкций оборудования при одновременном увеличении ресурсной надежности ЯЭУ. Кроме того, обеспечение качественной информацией по характеристикам, определяющим процесс эксплуатации, позволит значительно упростить обслуживание и, как следствие, сократить численность эксплуатационного персонала.

Изложенные соображения дают основание считать, что на ближайшие десятилетия развитие судовых ЯЭУ будет определяться качественным совершенствованием интегральных реакторов с водой в качестве теплоносителя-замедлителя.

Это отнюдь не означает, что блочные реакторные установки не имеют будущего. Несомненно, что улучшение их характеристик будет продолжаться эволюционным путем еще длительное время. Тем более что в некоторых случаях, когда потребуется предельная минимизация габаритных характеристик, блочная компоновка РУ может оказаться предпочтительной. При всем этом качественно новых компоновочных и структурных усовершенствований блочных установок ожидать, по-видимому, не следует.

Несмотря на отмеченную выше приоритетность развития ЯЭУ с реактором с водой под давлением, несомненно, будет продолжаться поиск нетрадиционных проектных решений с использованием других теплоносителей: металлов, солей, эвтектик, металлов, инертных газов и др. Однако, следует иметь в виду, что качественно новых достижений с использованием экзотических теплоносителей нельзя ожидать, если разработчики будут ориентироваться на схемы и конструктивные решения, оправдавшие себя в судовых РУ при использовании воды в качестве теплоносителя-замедлителя.

С учетом этого целесообразно обратить внимание на возможности одноконтурной газотурбинной ЯЭУ с высокотемпературным реактором с гелиевым теплоносителем, по которой ведутся проектные работы международной группой в составе организаций России, США, Франции и Японии. При должной отработанности ЯЭУ такого типа полученный опыт возможно окажется перспективным и для судовых ЯЭУ.

Заключение

Перспективные направления развития судовых ЯЭУ включают:

1. Внедрение интегральной компоновки реакторной установки;
2. Увеличение энергозапаса реактора в целях сокращения числа перезарядок реактора за время эксплуатации ЯЭУ;
3. Увеличение ресурсной надежности оборудования ЯЭУ;
4. Упрощение эксплуатации ЯЭУ за счет оптимизации систем управления контроля и профилактического обслуживания.

Перспективы использования ЯЭУ на коммерческих судах в условиях Севера России¹

Опыт использования атомных судов в России

Значимость освоения Северного морского пути для экономического развития России признавалась давно. Достаточно вспомнить известное утверждение М.В.Ломоносова: «Богатство России будет прирастать Сибирью и Северным океаном».

Но только в двадцатом столетии началась планомерная работа в этом направлении: гидрографические исследования в Северных морях, строительство первого в мире ледокола «Ермак» и др. Интенсивность этих работ возросла после Великой Октябрьской социалистической революции с началом развертывания индустриализации страны.

В предвоенный период было достигнуто значительное продвижение в освоении плавания в арктических широтах и развитии хозяйственной деятельности на Крайнем Севере Сибири. Севморпуть стал ключевым звеном в организации экономического подъема отсталых и ранее не исследованных территорий Севера. В послевоенный период, вплоть до начала так называемой «перестройки», продолжалось планомерное освоение Севморпути с использованием передовых достижений науки и техники.

Обеспечение бесперебойной доставки в больших объемах хозяйственных грузов, вывоз горнорудных материалов, леса, нефти, газа и других разрабатываемых ресурсов стало невозможным без создания мощных ледоколов. Поэтому отнюдь не случайно одним из первых направлений практического использования ядерной энергии явилось создание по инициативе академиков И.В. Курчатова и А.П. Александрова ледокола «Ленин» с ядерной энергетической

¹ Авторы: Митенков Ф.М. (ОКБМ), Рукша В.В. (Минтранс России), Головинский С.А. (ОАО «ММП»), Кашка М.М. (ОАО «ММП»), Яковлев О.А. (ОКБМ), Полуничев В.И. (ОКБМ), Панов Ю.К. (ОКБМ)

установкой (ЯЭУ), поскольку строительство мощных ледоколов, необходимых для регулярного сопровождения коммерческих судов в Арктике, на органическом топливе было практически невозможно по технико-экономическим соображениям. Основным преимуществом ледокола с ядерной энергетической установкой является автономность плавания — исходя из запасов топлива 4–5 лет. Дизель-электрические ледоколы меньшей мощности при расходе топлива 100–130 тонн в сутки имеют автономность 1,5–2 месяца, после чего требуется добункеровка в портах или с помощью танкеров ледового класса. Максимально возможные сроки навигации в Арктике с помощью дизель-электроходных ледоколов — 6–7 месяцев в Западном секторе Арктики и 3–4 — в Восточном, с помощью атомоходов — круглогодично. Производительность работы атомоходов в 4 раза выше, чем ледоколов типа «Капитан Сорокин» или «Москва», и в два раза выше, чем ледоколов типа «Ермак».

Начиная с 1975 года, когда на основе опыта эксплуатации первенца атомного флота был спроектирован и построен атомный ледокол «Арктика» — головной в серии атомоходов второго поколения, стала очевидной правильность и перспективность технической политики в области использования ядерной энергии на морском транспорте.

Первый ледокол с ЯЭУ — «Ленин» — был построен в короткие сроки: заложен в 1956 г., прошел швартовые испытания по полной программе и в 1959 г. передан в эксплуатацию. Его мощность на винтах — 44 000 л.с., водоизмещение около 20 000 т, максимальные длина и ширина соответственно 134 м и 27,6 м. Положительные результаты эксплуатации ледокола «Ленин» привели к созданию в России гражданского атомного флота в составе ледоколов: «Ленин», «Арктика», «Сибирь», «Россия», «Советский Союз», «Ямал», «Таймыр», «Вайгач» и атомного лихтеровоза-контейнеровоза «Севморпуть». Основные характеристики действующих атомных судов приведены в табл. 1.

Использование атомных ледоколов позволило увеличить продолжительность навигации в Арктике с трех месяцев до десяти, а в Западном секторе Арктики транспортные операции осуществляются круглогодично.

В 1977 г. ледокол «Арктика» прошел впервые до Северного полюса, в 1978 г. ледокол «Сибирь» провел торговое судно до Берингова пролива всего за 18 дней несмотря на тяжелые льды.

Высокий уровень надежности атомных ледоколов убедительно подтверждается таким беспрецедентным фактом: ледокол «Арктика» накануне своего 25-летия целый год интенсивно работал на ледовой трассе без захода в порты.

Основные характеристики действующих атомных судов

Технические параметры	Ледоколы		Лихтеровоз	
	типа «Арктика»	типа «Россия»	типа «Таймыр»	«Севмор-путь»
Длина наибольшая, м	148,0	150,05	150	260,1
Ширина наибольшая, м	30,0	30,0	29,2	32,2
Осадка максимальная, м	11,0	11,0	9,0	11,8
Высота борта на миделе, м	17,2	17,2	15,15	18,3
Водоизмещение, т	23460	23625	18259	61880
Скорость хода (с грузом), уз.	18,0	20,6	18,5	20,8
Ледопробитость, м	2,0	2,7	1,77	1,0
Мощность на винтах, л.с.	75000	75000	50000	40000
Число гребных винтов	3	3	3	1

К настоящему времени отечественный опыт использования ЯЭУ на арктических судах насчитывает 250 реакторо-лет.

Атомные суда – составная часть Мурманского морского пароходства (ММП), которое, в свою очередь, является важнейшей частью экономического комплекса Крайнего Севера и одновременно связующим звеном между Дальневосточными и Западными регионами России.

Северный морской путь объединяет в единую транспортную сеть крупнейшие реки Сибири. Для некоторых районов арктической зоны (Чукотка, острова арктических морей, побережья Таймырского автономного округа) морской транспорт является единственным средством перевозки грузов, а следовательно, и жизнеобеспечения населения.

Традиционные направления перевозок, осуществляемые уже в течение ряда лет, обеспечивают:

- жизнедеятельность Норильского Горного металлургического комбината и вывоз его продукции из Дудинки;
- экспорт лесных грузов из Игарки;
- снабжение Тикси, Певека, портов Колымы, а также других арктических портов и портопунктов всем необходимым для их жизнедеятельности (Северный завоз);
- внутриарктические перевозки между арктическими портами и пунктами.

В перспективе к этим направлениям будут добавлены транзитные каботажные и международные перевозки грузов. Возможно также переключение грузопотоков с других направлений на трассы СМП.

При освоении месторождений природного газа, нефти и газового конденсата арктических регионов, тяготеющих к СМП, появятся новые крупномасштабные грузопотоки, связанные как со снабжением пунктов добычи и переработки, так и вывозом углеводородного сырья.

Сложившаяся практика использования атомных ледоколов в настоящее время включает, в основном, районы западной Арктики: Баренцево море, районы Новой Земли, Земли Франца-Иосифа, район островов Варандей и Колгуев, а также архипелаг Шпицберген. Эпизодически атомные ледоколы осуществляют проводки судов в Белом море. В связи с дефицитом ледокольного обеспечения в стране, атомные ледоколы в ряде случаев направлялись для работы в морях восточной Арктики, а с 1995 г. при необходимости осуществляют ледокольную проводку на всем протяжении трассы Северного морского пути и замерзающих неарктических морях.

Для поддержания устойчивого судоходства на трассе, при сложившемся в последние годы грузопотоке в объеме 1,5 млн т в год, необходимо наличие в эксплуатации не менее пяти атомных ледоколов в составе: три линейных ледокола (типа «Арктика») и два ледокола с ограниченной осадкой (типа «Таймыр»).

Высокая надежность работы ледокольных ЯЭУ, неограниченность районов дальности плавания и длительности навигации позволили существенно уменьшить простой ледоколов и повысить экономические показатели их работы.

Затраты на доставку грузов по Северному морскому пути заметно сократились в связи с увеличением грузоподъемности проводимых судов, ускорения их проводки, увеличения навигационного периода, вплоть до круглогодичного в Западном секторе Арктики.

Внедрение комплексной автоматизации управления ЯЭУ, высокий уровень профессиональной подготовки персонала для современных атомных судов позволили существенно уменьшить численность эксплуатационного персонала в сравнении с численностью первого экипажа атомного ледокола «Ленин».

Примечательным является использование единственного в мире атомного лихтеровоза-контейнеровоза «Севморпуть». С момента начала работы (1989 г.) он прошел 302000 миль, перевез более 1,5 млн т грузов, осуществив за это время лишь одну перезарядку реактора. В целях сравнения можно привести любопытные цифры. Для перевозки такого груза судам типа СА-15, осуществляющим перевозки на Дудинской линии, пришлось бы выполнить около 100 рейсов, израсходовав почти 100 000 тонн топлива.

Если отталкиваться от приведенных результатов сравнения, то есть основания считать, что при определенных условиях оптимальное

использование в Арктике атомных судов должно включать и ледоколы, и суда ледового плавания типа «Севморпуть». Однако оптимальность может существенно зависеть от характера перевозимых грузов и мест их назначения.

Перспективы использования судов с ЯЭУ в Арктике

Президентом Российской Федерации в 2001 г. утверждена «Морская доктрина Российской Федерации на период до 2020 года», которая определяет государственную политику страны в сфере морской деятельности. В Арктическом регионе национальная политика определяется в первую очередь необходимостью обеспечения свободного выхода российского флота в Атлантический океан, а также возрастающей ролью Северного морского пути и приполярных районов для устойчивого экономического развития Российской Федерации.

Последовательное проведение такой политики позволит решать следующие долгосрочные задачи:

- защита интересов Российской Федерации и дна морей Северного Ледовитого океана;
- учет интересов нашего государства при разведке, освоении биоресурсов и разработке минерального сырья в российской экономической зоне и на континентальном шельфе;
- обеспечение национальных интересов Российской Федерации при дальнейшем развитии Северного морского пути, централизованное государственное управление этой транспортной системой, необходимое ледокольное обслуживание провоза грузов, представление равноправного доступа заинтересованным перевозчикам, включая иностранных;
- оптимальное использование транспортного флота с использованием атомных ледоколов для завоза грузов в Заполярье;
- создание судов ледового класса для широких перевозок в Арктике;
- строительство новых ледоколов с использованием новейших ЯЭУ с более высокими эксплуатационными характеристиками;
- модернизация и совершенствование инфраструктуры с целью обеспечения эксплуатационного обслуживания судов.

Очевидно, что программа перспективного развития атомного ледокольного флота должна формулироваться для решения перечисленных основных задач с учетом многолетнего эксплуатационного опыта. К настоящему времени часть ЯЭУ действующих атомных ледоколов либо исчерпала назначенный ресурс, либо близка к этому (табл. 2).

Таблица 2

Наработка ЯЭУ действующих ледоколов

Наименование судна	Год постройки	Средняя наработка в год, тыс. ч	Наработка на 01.11. 2002, тыс. ч	Срок службы на 01.11. 2002, лет	Наработка 100 000 ч		Наработка 150 000 ч	
					Год достижения наработки	Срок службы, лет	Год достижения наработки	Срок службы, лет
«Арктика»	1975	5,95	143	27	1990	15	2004	29
«Сибирь»	1977	6,22	95	19*	-	-	-	-
«Россия»	1985	6,88	91	17	2003	18	2014	29
«Советский Союз»	1989	6,58	70	13	2007	18	2016	27
«Ямал»	1992	6,2	58	10	2008	16	2019	27
«Таймыр»	1989	6,77	90	13	2004	15	2014	25
«Вайгач»	1990	6,53	81	12	2005	15	2016	26
«Севморпуть»	1988	6,53	75	14	2006	18	2016	28

Примечание. * Эксплуатация ледокола «Сибирь» приостановлена в 1992 г.

Выполненные исследования, а также ревизия состояния основного оборудования реакторной установки ледокола «Ленин», проведенная после вывода его из эксплуатации при наработке ~110 тысяч часов, подтвердили, что имеются значительные потенциальные возможности для увеличения назначенного ресурса.

Действительно, ревизия показала, что после работы в течение 110 тыс. часов главные циркуляционные насосы полностью сохраняют работоспособность. В частности, на подшипниковых опорах не выявлено заметного износа; электрические, механические и гидравлические характеристики сохранили свои проектные значения.

Такое же состояние зарегистрировано для приводов органов управления и защиты реактора, для арматуры.

Металловедческие исследования главных патрубков, металла корпуса реактор в районе активной зоны, сварного шва реактора не выявили каких-либо развивающихся дефектов. Это позволило сформулировать обоснованную методологию поэтапного продления ресурса ЯЭУ. Так, например, для ЯЭУ ледокола «Арктика» при назначенном ресурсе 100 000 часов ресурс поэтапно продлен до 150 000 часов, который к настоящему времени почти полностью использован в процессе эксплуатации до 2002 г.

Однако проведенный анализ в соответствии с разработанной методологией позволил обосновать возможность продления ресурса до 175 000 часов. Поэтапное продление ресурса должно проводиться в строгом соответствии с установленным порядком. Значительное увеличение назначенного ресурса ЯЭУ и соответствующего срока службы ледокола «Арктика» позволило избежать крайне неприятных последствий для работы на трассе Северного морского пути, обусловленных длительной задержкой завершения строительства атомного ледокола «50 лет Победы» и ввода его в эксплуатацию.

Опыт эксплуатации атомных ледоколов, выявленные проектантами возможности продления работы ледоколов за пределами назначенного ресурса и срока службы, позволяют сделать заключение, что задержка с вводом новых ледоколов на 6–7 лет может быть компенсирована за счет продления срока службы действующих ледоколов до 30–32 лет вместо проектного срока 26 лет.

Разработанная заинтересованными ведомствами программа «Атомные ледоколы» учитывает выявленную возможность существенного продления срока службы действующих ледоколов (до 30–32 лет).

Учитывая, что для проектирования и строительства головного ледокола нового поколения потребуется не менее 7 лет, необходимо уже сейчас развешивать работы по его созданию.

Прогнозируемые объемы грузоперевозок в Арктике (более 4 млн т в год) могут быть обеспечены действующими атомными ледоколами при условии введения в эксплуатацию достраивающегося атомного ледокола «50 лет Победы».

В дальнейшем для замещения выводимых из эксплуатации действующих ледоколов не позднее 2014 г. должны быть построены новые атомные ледоколы.

Исследования и соответствующие разработки, выполненные ЦНИИМФ и ЦКБ «Айсберг» в конце 80-х годов, подтвердили техническую возможность и экономическую целесообразность использования в Арктике двухосадочных атомных ледоколов, поскольку при этом сокращается типаж ледоколов нового поколения за счет совмещения в одном ледоколе функций, выполняемых в настоящее время ледоколами двух типов – линейными типа «Арктика» и мелкосидящими типа «Таймыр».

Для обеспечения прогнозируемых грузопотоков потребуется четыре новых универсальных двухосадочных ледоколов с мощностью на винтах ~ 80 000 л.с. Рассматривается также проект строительства атомного ледокола-лидера с мощностью на винтах ~ 145 000 л.с. Новые универсальные ледоколы должны иметь ледопробитость 2,7–2,8 м. Это обеспечит гарантируемую круглогодичную навигацию в Западном секторе Арктики. Надежная круглогодичная навигация на всем протяжении Северного морского пути с учетом экстремальных по ледовым условиям навигаций может быть обеспечена сверхмощным ледоколом-лидером с ледопробитостью не менее 3,4–3,5 м.

При создании новых ледоколов, конечно, должны быть в полной мере использованы современные достижения науки и судостроительной технологии в области оптимизации обводов корпуса ледокола, мореходных качеств при плавании по чистой воде, маневренности во льдах, движительно-рулевого комплекса и других средств повышения ледопробитости. Ожидаемые характеристики атомных ледоколов нового поколения приведены в табл. 3.

По расчётам центрального НИИ морского флота, реализацию программы по созданию новых атомных ледоколов целесообразно начать с двухосадочного ледокола универсального назначения. При разработке ледокола нового поколения необходимо принять во внимание, что судно должно быть многоцелевым, способным выполнять весь комплекс работ на шельфе: снабженческих, исследовательских, производства электроэнергии, базирования большегрузных вертолётов и т. д.

Технико-экономические исследования показывают, что эксплуатация атомных ледоколов нового поколения приведет к значительному

Характеристики ледоколов нового поколения

Характеристика	Ледокол-лидер	Двухосадочный ледокол
Длина наибольшая, м	206,0	176,0
Ширина наибольшая, м	40,0	34,0
Высота борта, м	20,3	15,8
Осадка по КВЛ, м	13,0	11/8,5
Водоизмещение по КВЛ, м	55600	32400
Тип энергетической установки	ЯЭУ	ЯЭУ
Мощность на валах, МВт (л.с.)	110 (145000)	60 (80000)
Число гребных винтов, шт.	3	3
Ледопробиваемость, м	3,5	2,9

увеличению скорости проводки судов и соответственно к снижению затрат на транспортирование грузов. Ожидаемая рентабельность перевозок повысится на 70–80 % в зависимости от вариантов использования ледоколов.

Протоколом Совещания у Председателя Правительства Российской Федерации от 9 января 2003 г. предусматривается разработка концепции развития Северного морского пути и внесение в Правительство Российской Федерации до 1 июня 2003 г. предложений по проектированию и строительству атомных ледоколов и судов атомно-технологического обслуживания нового поколения.

Основные требования к ЯЭУ для ледоколов нового поколения

Прогнозируемые особенности и характеристики ледоколов нового поколения в значительной степени определяют и основные требования к их ЯЭУ.

На действующих атомных ледоколах используется ЯЭУ, проект которой разработан более 30 лет назад и каких-либо существенных изменений в проект в последующие годы не вносилось.

За прошедшие годы накоплены новые знания и технические решения применительно к судовым ЯЭУ. Проанализирован многолетний опыт эксплуатации ледоколов. Ужесточились требования по безопасности ко всем видам ядерных энергоисточников, сложились новые подходы при решении вопросов безопасности и др.

Безусловно, все изменения, относящиеся непосредственно или косвенно к ЯЭУ, должны найти соответствующее отражение при разработке проектов ЯЭУ для ледоколов нового поколения. Для этого должны быть выработаны обоснованные технические требования к ЯЭУ, при качественной реализации которых в проекте и при

изготовлении эксплуатация должна подтвердить их достаточность и оптимальность.

Основными техническими требованиями, предъявляемыми к ледоколу нового поколения, являются:

- обеспечение требуемой нормативными документами безопасности для эксплуатационного персонала и окружающей среды при любых физически возможных аварийных ситуациях;
- высокая ресурсная надежность и безотказность оборудования ЯЭУ;
- срок службы ЯЭУ должен быть не менее срока службы ледокола при минимальной доле заменяемого оборудования;
- энергозапас активной зоны реактора должен определяться из условия не более одной перезарядки реактора за время службы ЯЭУ;
- обеспечение в процессе эксплуатации оперативного контроля (мониторинга) за расходом ресурса критического оборудования, определяющего безопасность и работоспособность ЯЭУ;
- оптимизация комплексной системы управления в обеспечение простоты управления ЯЭУ с включением в ее состав автоматизированной подсистемы «советчик оператора» и тренажера;
- минимизация капитальных и эксплуатационных затрат с целью сокращения сроков окупаемости;
- минимизация численности обслуживающего ЯЭУ персонала.

В судовых ЯЭУ в настоящее время используются только реакторы с водой в качестве теплоносителя и замедлителя нейтронов. Несмотря на относительно низкие параметры вырабатываемого пара (температура, давление), а следовательно, и низкие значения термодинамического КПД (~ 30 %), практика подтверждает рентабельность использования реакторов такого типа в коммерческих целях. Поэтому можно утверждать, что в ближайшие несколько десятилетий при создании перспективных ледоколов следует ориентироваться на ЯЭУ с водо-водяными реакторами, тем более что эксплуатация и опыт проектирования подтверждают наличие потенциальных возможностей для совершенствования и реактора, и ЯЭУ в целом. Это позволяет выразить уверенность, что реализация перспективных требований, сформулированных выше для ледоколов нового поколения, не может вызывать сомнений.

Выбор оптимального варианта перспективной ЯЭУ будет опираться на исследования и разработки двух направлений, различающихся в первую очередь компоновкой оборудования первого контура реакторной установки (РУ): традиционная для судовых РУ блочная компоновка основного оборудования и интегральная компоновка, то есть компоновка оборудования первого контура в одном корпусе.

Для каждого из этих направлений характерны свои достоинства и недостатки. Так, блочная компоновка имеет определенные преимущества по сравнению с интегральной по высотным габаритам и доступности к оборудованию первого контура для возможной замены и ремонта. Вместе с тем, ей свойственны бульшая разветвленность первого контура, наличие неотключаемых участков трубопроводов большого диаметра, бульшее количество арматуры, корпусных конструкций.

При интегральной компоновке оборудования теплоноситель первого контура локализован в одном корпусе, отсутствуют неотключаемые участки первого контура, что, безусловно, предпочтительно в целях повышения уровня безопасности. Кроме того, резко сокращается число корпусных конструкций, арматуры. Интегральная компоновка РУ способствует совмещению функций ряда систем нормальной эксплуатации и систем, предупреждающих недопустимое развитие аварийных ситуаций.

К недостаткам интегральной компоновки РУ следует отнести затрудненный доступ к трубным системам парогенераторов в случае их замены или ремонта и более сложные условия перегрузки топлива. Поэтому интегральная компоновка предполагает использование отработанного, высоконадежного оборудования.

Для окончательного решения вопроса о типе установки необходимо корректное сравнение обоих типов РУ с привлечением всех критериев, определяющих оптимальность ЯЭУ для ледоколов нового поколения.

Заключение

1. Приведенные выше соображения позволяют считать, что многолетняя эксплуатация атомного ледокольного флота России подтвердила технико-экономическую эффективность его использования.
2. Необходимость и перспективность освоения и развития северных регионов страны возможна только при наличии мощных атомных ледоколов.
3. Научно-технические и производственные возможности для создания атомных ледоколов нового поколения в стране имеются.
4. Необходимо учитывать, что промедление с началом работ по созданию ледоколов нового поколения недопустимо, поскольку сроки вывода действующих ледоколов из эксплуатации уже обозначены.
5. Следует определиться с организацией финансирования работ, в котором, по нашему мнению, должны участвовать потенциальные пользователи.

Реакторы на быстрых нейтронах

Перспективы развития быстрых реакторов–размножителей¹

На современном этапе становления атомной энергетики не только определились базовые реакторы с водяным теплоносителем (ВВЭР, РБМК, PWR, BWR), но и получила практическое подтверждение идея расширенного воспроизводства в реакторах ядерного топлива, то есть возможность организации такого нейтронно-физического процесса, при котором количество вновь образующихся делящихся нуклидов существенно превышает количество разделившихся (коэффициент воспроизводства $K_B > 1$). Такие реакторы позволят создать двухкомпонентную структуру атомной энергетики (реакторы-размножители и тепловые реакторы), при которой тепловые реакторы работают на избыточном ядерном топливе, нарабатываемом в реакторах-размножителях. В некоторых странах в 50–60-х годах были созданы экспериментальные реакторы-размножители с натриевым теплоносителем, в которых реакция деления поддерживается преимущественно за счет быстрых нейтронов. Всесторонние исследования, проведенные на экспериментальных реакторах-размножителях, позволили создать опытно-промышленные АЭС с такими реакторами.

В СССР были сооружены две опытно-промышленные АЭС с быстрыми реакторами, реакторные установки которых различаются компоновочными решениями: петлевая БН-350 в Шевченко и моноблочная БН-600 в г.Заречном (Белоярская АЭС). АЭС с БН-350 отработала с превышением на пять лет назначенный ресурс (с 1973 по 1998 гг.) и в настоящее время выведена из эксплуатации. АЭС с БН-600 успешно эксплуатируется с 1980 г.

¹ Журнал «Атомная энергия», т. 92, вып. 6, июнь 2002, с. 423–432. Автор – Митенков Ф.М. Печатается с дополнениями

Актуальность развития реакторов–размножителей

Возможность развития крупномасштабной атомной энергетики определяется в первую очередь наличием доступных делящихся материалов. Естественные запасы урана исследованы и оценены. С учетом их ограниченности, а также использования в тепловых реакторах не более 1 % урана, долговременное масштабное развитие атомной энергетики невозможно. Этого заключения не меняет возможность рециклирования топлива тепловых реакторов и вовлечения тория в топливный цикл атомной энергетики. Реакторы-размножители по существу являются единственным средством полного использования урана и тория для производства энергии и тем самым обеспечивают длительное развитие атомной энергетики. Поэтому перевод атомной энергетики на замкнутый топливный цикл неизбежен, и реакторы-размножители со временем должны играть в ней определяющую роль.

Следует заметить, что реакторы-размножители эффективно могут использоваться не только для расширенного воспроизводства ядерного топлива, но и для утилизации оружейного плутония, выжигания долгоживущих компонентов отходов отработавшего топлива перед захоронением.

В настоящее время только в России в коммерческой эксплуатации находится АЭС с быстрым реактором БН-600, в стадии строительства – четвертый энергоблок Белоярской АЭС с реактором БН-800, в котором использованы основные решения, оправдавшие себя в БН-600, и учтены новые требования по безопасности и экономической оптимизации. Это позволило заметно улучшить технико-экономические показатели энергоблока, повысить электрическую мощность на 200 МВт и уровень безопасности. В это же время в США и Великобритании была прекращена эксплуатация прототипных реакторов-размножителей, во Франции заканчивается эксплуатация опытно-промышленного реактора «Феникс».

Сокращение объема и интенсивности работ по реакторам данного типа является отражением общего спада в атомной энергетике, наблюдавшегося после аварий на АЭС «Три-Майл-Айленд» и Чернобыльской АЭС и, как следствие, избытка урана на международном рынке. Не последнюю роль здесь играет и недостаточная экономическая конкурентоспособность первых реакторов-размножителей.

В связи с этим необходимо отметить, что существенное превышение (на ~30 %) капитальных затрат на сооружение энергоблоков с реакторами-размножителями по сравнению с ВВЭР объясняется в значительной степени тем, что при создании опытно-промышленных энергоблоков с быстрыми реакторами-размножителями

экономические показатели не относились к числу приоритетных. Определяющими характеристиками на этом этапе являлись безопасность, надежность, безотказность, коэффициент воспроизводства. Ко времени их создания энергоблоки с ВВЭР уже прошли достаточно большой путь экономической оптимизации в части их проектно-конструкторского совершенствования, технологии изготовления, монтажа оборудования и организации строительных работ.

Большие возможности технико-экономической оптимизации энергоблоков с реакторами-размножителями, несомненно, имеются и будут использоваться в перспективных проектах. Для этого необходимо при проектировании учитывать, что принципиальная значимость основной функции быстрых реакторов – расширенное воспроизводство ядерного топлива – не должна заслонять необходимость совершенствования и таких «традиционных» показателей, как:

- безопасность;
- ресурсная надежность оборудования;
- простота проектных решений;
- простота управления реакторной установкой;
- ремонтпригодность оборудования и систем;
- конкурентоспособность по таким экономическим показателям, как капитальные затраты, себестоимость производимой электроэнергии, срок окупаемости затрат и др.

Экономическое совершенствование реакторов-размножителей

Одним из определяющих показателей эффективности энергоблока АЭС является термодинамический КПД цикла преобразования тепловой энергии в электрическую. В энергоблоках с реакторами типа БН термодинамический КПД равен 40–43 %, что значительно выше КПД энергоблоков с реакторами типа ВВЭР – 32–35 %. Это обусловлено существенно более высокой температурой теплоносителя (натрия) на выходе из быстрого реактора – 550 °С по сравнению с 320–325 °С у реакторов ВВЭР.

Дальнейшее повышение КПД энергоблока с быстрым реактором может быть реализовано за счет следующих мероприятий:

- увеличение температуры натрия второго контура на выходе промежуточного теплообменника путем развития теплообменной поверхности;
- повышение теплостойкости конструкционных материалов активной зоны (оболочек твэлов и чехлов ТВС) в целях роста температуры натрия на выходе реактора;

– перевод парогенератора в закрытый режим работы по давлению и температуре пара.

Реализация указанных мероприятий может увеличить термодинамический КПД дополнительно на 2–4 %. В случае отказа от высоких значений КВ ликвидация боковой зоны воспроизводства также будет способствовать снижению затрат и, следовательно, повышению экономической эффективности быстрого реактора.

Существенное снижение капитальных затрат может быть получено за счет снижения металлоемкости реактора. Конструктивные разработки, выполненные в процессе поиска оптимального варианта модернизации реактора БН-600 (проект БН-600М), показали, что за счет совершенствования конструкции промежуточного контура и оборудования систем обращения с ядерным топливом металлоемкость может быть уменьшена на 25 %, в случае дополнительной замены модульных парогенераторов на корпусные – на 58 %, что позволяет снизить и строительные объемы и в целом приблизиться к удельным затратам на ВВЭР и даже превзойти их.

Сравнительный технико-экономический анализ энергоблоков с реакторами БН-800 и ВВЭР-1000 (проект В-392) показал, что совершенствование промежуточного контура и транспортно-технологической системы БН-800 и последующая оптимизация строительных решений позволяет даже при сохранении модульных парогенераторов свести различие в удельных затратах между энергоблоками до менее 11 %. Выполненные к настоящему времени поисковые конструктивные разработки корпусного парогенератора для реакторных установок типа БН привели к достаточно обоснованной конструктивной схеме парогенератора, который сочетает достоинства корпусного и модульного парогенератора, что позволяет в несколько раз уменьшить площадь парогенераторной выгородки, уменьшить ее высоту и резко сократить металлоемкость. С учетом возможной оптимизации систем обращения с ядерным топливом и определенной схемы корпусного парогенератора есть основания ожидать, что технико-экономические показатели АЭС с реакторами типа БН не только не будут уступать при прочих равных условиях АЭС с реакторами типа ВВЭР, но и превзойдут их.

Наличие промежуточного контура в быстром реакторе следует рассматривать как обязательную составляющую часть, которая не только исключает химическое взаимодействие радиоактивного натрия первого контура с водой и паром при нарушении герметичности теплообменной поверхности в парогенераторах, но и является физическим барьером, предотвращающим воздействие высокого давления воды и пара (более 18 МПа) на корпус реактора и его внутренние компоненты, включая активную зону.

Перспективным направлением улучшения экономических показателей энергоблоков с быстрыми реакторами также является оптимизация топливного цикла, уменьшение вклада топливной составляющей в себестоимость производимой электроэнергии. Многолетний опыт эксплуатации БН-600 и исследования свидетельствуют о наличии больших возможностей на этом пути. Работы ведутся по двум направлениям: повышение выгорания диоксидного топлива за счет оптимизации характеристик используемых материалов оболочки твэлов и чехлов ТВС; использование в активной зоне вместо диоксидного топлива нитридного, имеющего большую плотность и теплопроводность. За время эксплуатации БН-600 выгорание топлива удалось повысить до 11 % по тяжелым атомам, что намного больше проектной – 7 % т.а. Имеются основания ожидать дальнейшего увеличения выгорания. Так, на реакторе «Феникс» достигнуто выгорание МОХ-топлива 15 % т.а. Нитридное топливо было апробировано на экспериментальном реакторе БР-10, где было получено выгорание 8 % т.а.

Для дальнейшего повышения надежности и безопасности также имеются перспективные решения. Одно из них – локализация всего объема натрия первого контура в корпусе, включая систему очистки. При таком решении полностью исключаются патрубки на корпусе и трубопроводы первого контура за пределами реактора. Это существенно упрощает конструкцию первого контура, исключает течи радиоактивного натрия и соответственно его аварийное возгорание.

Указанные направления совершенствования и технико-экономическая оптимизация энергоблоков в целом далеко не исчерпывают всех возможностей, но и перечисленные направления свидетельствуют, что достижение конкурентоспособности с лучшими энергоблоками ВВЭР реально и при системном подходе к разработке перспективных проектов, несомненно, будет реализовано.

Теплоноситель в реакторах–размножителях

Как известно, в результате всесторонних исследований различных теплоносителей разработчики проектов реакторов-размножителей во всех странах остановили свой выбор на натрии. Этому решению способствовали исключительно хорошие теплофизические свойства натрия, его совместимость со многими конструкционными материалами, относительная простота поддержания качества при эксплуатации, а также низкая стоимость:

	Натрий	Свинец
Плотность при 450 °С, кг/м ³	845	10 470
Температура, °С		
плавления	97,8	327,4
кипения	883	1737
Теплопроводность при 450 °С, Вт/(м·К)	68,9	15,7
Теплоемкость при 450 °С, кДж/(кг·К)	1,272	0,155
Распространение в земной коре, %	2,85	1,6·10 ⁻³
Стоимость натрия реакторной очистки, дол./кг	3-5	-
Стоимость свинца, долл./кг:	-	1
- неочищенного (по ценам 2001 г.)		
- очищенного марки СОО (по преysкуранту № 02-01 от 01.01.1986)		1,25
- очищенного марки СОООО (по преysкуранту № 02-01 от 01.01.1986)	-	200

Однако натрий пожароопасен при контакте с водой и воздухом. Поэтому потребовалось разработать специальные технические решения, исключающие недопустимые проявления пожароопасности. Эффективность этих решений подтверждена многолетней промышленной эксплуатацией АЭС с реакторами БН-350 и БН-600. Конечно, эти решения наложили свой отпечаток на конструкцию оборудования, контактирующего с натрием, и на схему реакторной установки в целом.

В последние годы довольно широко обсуждается предложение о замене натрия другим теплоносителем и уже развернуты проектные работы по использованию свинца в реакторах-размножителях. При обосновании целесообразности замены декларируется, что натрий исчерпал себя как теплоноситель и не создает условий для технического совершенствования реакторов-размножителей, повышения их безопасности, улучшения экономических показателей. Все эти негативные утверждения однозначно связываются с пожароопасностью натрия и низкой температурой кипения. Однако каких-либо результатов конкретных исследований в подтверждение указанных утверждений не приводится. Выше были обозначены реальные направления технического совершенствования и оптимизации характеристик установок с реакторами БН, по которым уже ведутся плановые работы в течение нескольких лет. Большинство этих работ носит общий характер и отнюдь не ограничивается только особенностями теплоносителя. Поэтому сделать обоснованное заключение о предпочтительности того или иного теплоносителя в реакторе-размножителе, сравнивая только их отдельные физические свойства, нельзя. Реакторные установки — это сложные технические комплексы, и оптимальность

их технико-экономических и эксплуатационных характеристик не может обеспечиваться за счет какой-либо отдельной составной части, например, теплоносителя. Она практически достигается за счет системной оптимизации, которая всегда предполагает выбор решений на основе компромисса. При этом отдельные составные части могут иметь неоптимальные значения или свойства. Поэтому обоснование целесообразности замены натрия на другой теплоноситель, например свинец, требует системного анализа в рамках реакторной установки, где пожароопасность натрия и инертность свинца будут только одними из многих факторов, подлежащих учету при выборе решения.

Корректный сравнительный анализ затрудняется тем, что по натрию в нашей стране и других странах уже накоплен большой опыт в процессе создания и эксплуатации экспериментальных, демонстрационных и опытно-промышленных реакторных установок и энергоблоков. Затраты в СССР на их создание, исследования, эксплуатацию оцениваются в ~12 млрд дол., в мире в целом – 50 млрд дол. Ни одного реактора в мире со свинцовым теплоносителем не создавалось и никакого опыта по его использованию как теплоносителя нет.

Ссылки на опыт использования эвтектического сплава свинец-висмут в корабельных реакторных установках неправомерны, поскольку по физическим характеристикам он значительно отличается от свинца, в первую очередь, по температуре плавления (температура плавления свинцово-висмутового сплава – 127 °С, свинца – 327,4 °С). Температура плавления теплоносителя в значительной степени определяет проектные, конструктивные решения и реактора, и установки в целом, эксплуатационные условия, ремонтпригодность. Для свинца потребуются заново разработать систему поддержания качества при эксплуатации реакторной установки, поскольку рабочая температура, соотношение объема свинца и омываемых им поверхностей резко отличаются от соответствующих значений в корабельной установке со сплавом свинец-висмут.

Поэтому, обсуждая замену теплоносителя, следует понимать, что речь идет о совершенно новом реакторном направлении в атомной энергетике, по которому ни в нашей стране, ни в мире опыта нет. Учет этого обстоятельства приводит к заключению, что создание реактора-размножителя со свинцовым теплоносителем потребует проведения не меньшего объема исследовательских, экспериментальных, опытных работ и существенно больших финансовых затрат.

Конечно, отказ от многолетнего дорогостоящего опыта использования натриевого теплоносителя не может основываться только на декларативных суждениях сторонников свинцового теплоносителя. Для этого необходимы объективные выверенные результаты сравни-

тельного анализа. Масштабность этой проблемы и последствия решений таковы, что безусловно требуется представительное обоснование целесообразности развертывания работ со свинцовым теплоносителем.

Опыт создания реакторных установок нового типа и различного назначения позволяет выделить несколько последовательных этапов, которых, безусловно, следует придерживаться. Применительно к рассматриваемой проблеме их можно сформулировать следующим образом:

- принципиальное обоснование целесообразности создания реактора-размножителя со свинцовым теплоносителем. Основу обоснования должен составлять перечень новых потребительских качеств, которые в принципе не могут быть обеспечены реакторами с натриевым теплоносителем;
- обоснование технической реализуемости предложения в рамках действующих обязательных нормативов с гарантированным обеспечением заявленных потребительских качеств; обоснование как минимум в объеме развернутого технического предложения или эскизного проекта с отражением специфических особенностей, связанных со свинцовым теплоносителем;
- обоснование необходимых научно-исследовательских, экспериментальных, опытно-конструкторских работ, сроков их завершения, оценка необходимых для их выполнения финансовых средств;
- обоснование этапов создания реактора-размножителя со свинцовым теплоносителем с учетом традиционного подхода: экспериментальный реактор, демонстрационный реактор, коммерческий (промышленный) реактор.

К сожалению, сторонники предложения об использовании свинцового теплоносителя по существу не информируют о каких-либо новых потребительских качествах, которые могут быть получены только в реакторах с этим теплоносителем, ограничиваясь утверждением, что в таком реакторе обеспечивается «естественная безопасность».

Сравнительные относительные характеристики активных зон рассматриваемых быстрых реакторов следующие:

	БН-800 (натрий)	БРЕСТ-300 (свинец)
Удельная загрузка делящегося материала, кг/кВт	1	1,9
Теплонапряженность	1	0,4
Коэффициент теплоотдачи в ТВС	1	0,17
Объемная доля топлива	1	0,6
Макросечения замедления нейтронов в теплоносителе	1	0,27
Макросечения поглощения нейтронов в теплоносителе	1	2,29

Из рассмотрения приведенных характеристик можно сделать заключение, что по теплофизическим и нейтронно-физическим параметрам, а также экономическим показателям реактор со свинцовым теплоносителем всегда будет существенно уступать реактору с натриевым теплоносителем при реализуемых конструктивных решениях и материалах активной зоны. Так, нетрудно убедиться, что при одной и той же максимальной температуре оболочки твэла температура свинца на выходе из реактора должна быть на 40–50 °С ниже, чем натрия, а это непосредственно скажется на температуре пара и термодинамическом КПД.

В ряде исследований проведено детальное сравнение натрия и свинца как возможных теплоносителей, отмечены достоинства и недостатки каждого из них и по результатам сделано заключение о неоспоримом преимуществе реактора с натриевым теплоносителем по таким параметрам, как гидравлические потери, мощность на прокачку, уровень естественной циркуляции. По теплоаккумулирующей способности он уступает реактору со свинцовым теплоносителем на ~20 %. При одной и той же тепловой мощности размеры реактора со свинцовым теплоносителем будут существенно превышать размеры реактора с натриевым теплоносителем. При сравнимых условиях оборудование для реактора со свинцовым теплоносителем будет существенно более металлоемким.

Безопасность реакторов–размножителей

При использовании свинцового теплоносителя большие надежды связываются с реализацией концепции «естественной безопасности». По мнению авторов проекта, «естественная безопасность» является тем принципом, который позволит снизить вдвое стоимость оборудования систем и сооружений АЭС, поскольку их стоимость якобы определяется требованиями безопасности. Высокий уровень безопасности за счет отказа от потенциально опасных решений и использования природных закономерностей, по их мнению, создает предпосылки для упрощения конструкций, снижения требований к основному и вспомогательному оборудованию, сооружениям АЭС, а также персоналу, к отказу от дополнительных систем безопасности. В этом утверждении обращает на себя внимание указание на значимость отказа от потенциально опасных решений и учета природных закономерностей. Но эти два положения являются само собой разумеющимися для конструкторов любых технических систем, поскольку попытки создавать какую-либо систему вопреки природным законам, используя потенциально опасные решения, не более чем нонсенс.

Учитывая неопределенность содержания введенного понятия «естественная безопасность», с одной стороны, и принципиальную значимость ее реализации в проекте согласно утверждению авторов, с другой, имеет смысл попытаться раскрыть конкретное содержание понятия с помощью доступных проектных материалов о свинцовом теплоносителе (сообщения, публикации, проектные разработки). Такой подход приводит к заключению, что естественная безопасность предполагает:

- детерминированное исключение тяжелых аварий;
- выбор наиболее тяжелой (максимальной) проектной аварии, прекрывающей по масштабам возможных последствий любые другие, включая ошибки персонала;
- воспроизводство ядерного топлива в активной зоне с КВА ~ 1 ;
- запас реактивности всегда меньше Я;
- отрицательный пустотный эффект реактивности;
- необходимые запасы по температурам теплоносителя и топливной композиции до фазовых переходов;
- надежность теплоотвода от активной зоны в любых ситуациях;
- наличие стабилизирующих обратных связей по температуре, расходу теплоносителя;
- баланс радиоактивности между извлекаемым из Земли ураном и захораниваемыми радиоактивными отходами.

Из рассмотрения приведенного перечня положений в совокупности и составляющих, по-видимому, содержание понятия «естественная безопасность», можно видеть, что за исключением последнего положения, непосредственно не относящегося к реакторной установке, в нем не содержится чего-то существенно нового, качественно отличающегося от тех положений, которыми традиционно руководствуются при проектировании реактора, реакторной установки и АЭС с быстрым реактором с натриевым теплоносителем. Однако необходимо внести уточнения. Акцент на детерминированное исключение тяжелых аварий и отрицание необходимости вероятностного анализа наряду с детерминированным неправомерен. Детерминированный подход предполагает точное (однозначное) знание всех параметров, описывающих конструкцию, процессы и др. Практически так не бывает и не только в инженерной практике, в связи с чем детерминированное описание всегда условно. Эта условность и диктует необходимость варьирования параметров и вероятностного анализа при теоретических исследованиях, что особенно важно при оценке безотказности оборудования и риска. Относительно выбора максимальной проектной аварии следует напомнить, что по рекомендации МАГАТЭ в национальные нормативы по безопасности

внесено положение о постулированной аварии, которое предписывает, что в тех случаях, когда невозможно достоверно обосновать нереализуемость в данной конструкции реактора физически возможных аварий, приводящих к тяжелым последствиям для окружающей среды, следует постулировать расплавление активной зоны и доказать, что принятые проектные решения исключают недопустимые воздействия на окружающую среду и население. Представляется, что такой подход однозначно решает вопрос о максимальной аварии.

Обеспечение $K_{BA}=1$ и запаса реактивности меньше β в течение всего периода работы, отрицательного пустотного эффекта реактивности в реакторах с натриевым или свинцовым теплоносителем безусловно желательно, но оно связано с решением следующих одноклассовых задач:

- определение технически реализуемых в реакторе условий, включая требования к коэффициенту воспроизводства активной зоны, точности обеспечения топливной загрузки, стабильности изотопного состава топлива, обратным связям, режимам работы и скорости их изменений и др., при которых допустимо ограничение запаса реактивности менее β ;
- создание активной зоны с более плотным топливом, чем диоксид, и достаточно глубоким выгоранием.

В обоих случаях решение задачи связывается с нитридным топливом. Затраты на отработку нитридной зоны с натриевым теплоносителем будут, конечно, существенно меньше, поскольку материалы активной зоны, режимы работы и др. уже известны и отработаны. Запас по температуре фазового перехода требует конкретного рассмотрения с учетом конструкционных материалов, используемых в активной зоне и реакторе в целом, поскольку есть основания полагать, что существует оптимальный запас относительно температуры фазового перехода теплоносителя. Например, в случае тяжелых аварий, приводящих к перегреву активной зоны, температурное состояние ТВЭЛов будет существенно различно для натриевого и свинцового теплоносителей. Действительно, при температуре плавления оболочки ТВЭЛа (сталь) ~ 1450 °С при кипящем натрии оболочка не плавится, интенсифицируется теплоотдача. При свинцовом теплоносителе оболочка расплавляется еще до того, как свинец закипит ($T_s=1720$ °С), расплавляются также и металлоконструкции.

Перечень систем безопасности для быстрого реактора со свинцовым теплоносителем, которые разработчик предусматривает, руководствуясь принципом «естественной безопасности», аналогичен перечню для быстрого реактора с натриевым теплоносителем, который проектировался по традиционной схеме:

- **защитные системы** – системы аварийного расхолаживания, аварийной защиты реактора, защиты от превышения давления газа в реакторе, аварийного сброса пара при течах парогенератора, защиты от превышения давления газа во втором контуре, обнаружения течи в парогенераторах;
- **локализующие системы** – страховочный корпус реактора, страховочные кожухи на вспомогательных трубопроводах первого контура, система предотвращения выхода радиоактивных газов и аэрозолей в обслуживаемые помещения и окружающую среду;
- **обеспечивающие системы** – системы надежного производственного водоснабжения, надежного электроснабжения систем безопасности, пожаротушения кабельных помещений систем безопасности, вентиляции и кондиционирования воздуха помещений систем безопасности, управляющие системы безопасности (по номенклатуре защитных, локализующих и обеспечивающих систем безопасности).

Составы систем безопасности полностью совпадают, за исключением системы пожаротушения, которая предусматривается для реактора с натриевым теплоносителем. Это и позволяет утверждать, что введенное понятие «естественная безопасность» нового содержания не несет.

В обоих случаях безопасность достигается за счет целенаправленного выбора схемных и конструктивных решений, реализации необходимых обратных связей (по знаку и значению), использованию самосрабатывающих защитных устройств и при необходимости физических барьеров на пути возможного распространения радиоактивных продуктов при тяжелых авариях.

Конструктивные решения

Опыт создания реакторной установки с разными теплоносителями однозначно свидетельствует об определяющей роли теплоносителя при выборе конструктивных решений, материалов конструкции и обосновании эксплуатационных режимов. Поэтому во всех известных случаях созданию демонстрационных и коммерческих реакторов с новым теплоносителем предшествовала разработка экспериментальных реакторов и проведение всесторонних исследований.

В нашей стране созданию первой АЭС с быстрым реактором предшествовало создание экспериментальных реакторов БР-5, БОР-60. Такая последовательность позволила получить необходимую информацию о технологии обращения с натрием, выработать требования по предотвращению недопустимых проявлений его химической активности, проверить обоснованность выбранных конструкционных

материалов, ядерного топлива и др. Именно на результаты исследований в экспериментальных реакторах опирались при проектировании АЭС с БН-350, а затем с БН-600 и БН-800. С учетом сказанного нельзя признать обоснованным предложение начать освоение свинцового теплоносителя с сооружения АЭС с реактором электрической мощностью 300 МВт, минуя стадию экспериментальных реакторов малой мощности. Апробирование наиболее ответственных конструктивных решений, как-то конструктивных схем приводов поглощающих сборок, фиксации ТВС и др., выбор и аттестация конструкционных материалов, контактирующих со свинцом, обоснование требований к ним должны проводиться «с нуля». То же относится и к обоснованию требований, условий и средств поддержания характеристик свинца при эксплуатации, от которых также зависит выбор конструкционных материалов. Переносить решение перечисленных принципиальных вопросов со стадии экспериментального реактора на стадию демонстрационной АЭС недопустимо.

Вызывает возражение и отказ от трехконтурной схемы реакторной установки, принятой для всех установок с быстрыми реакторами. Хотя в случае свинцового теплоносителя опасность недопустимых радиационных последствий при контакте свинца первого контура с водой отсутствует, но остается опасность переопрессовки первого контура и масштабного разрушения активной зоны при возможном воздействии импульса давления в случае аварийной разгерметизации теплообменной поверхности парогенератора. Скорее всего, отказ от промежуточного контура является потенциально опасным решением.

Неординарной задачей для активной зоны со свинцовым теплоносителем является разработка устройства механической фиксации ТВС, исключающего ее всплытие при работе реактора и в то же время гарантирующего возможность выгрузки ТВС после длительного (7–14 лет) пребывания в свинце при температуре более 400 °С, теплосменах, интенсивном нейтронном облучении. Особенно сложной для практического решения задачей может оказаться экспериментальное подтверждение надежности той или иной схемы фиксации.

Если при проектных решениях нельзя будет доказать принципиальную (физическую) невозможность расплавления активной зоны, то максимальная авария будет совпадать с постулированным расплавлением активной зоны. Анализ такой аварии сведется к решению двух задач:

- недопущение образования расплавом вторичной критической массы;
- обеспечение теплоотвода от расплава при сохранении целостности корпуса реактора.

В реакторе с натриевым теплоносителем положительное решение первой задачи достигается за счет организации скопления расплава в днище корпуса при гарантированном исключении критичности. При этом принимаются конструктивные меры для обеспечения теплоотвода от расплава, исключающие перегрев корпуса реактора. В случае реактора со свинцовым теплоносителем плотность расплава активной зоны будет меньше плотности свинца, поэтому определенного представления о месте скопления расплава не будет, и велика вероятность его скопления за пределами корпуса реактора и в разных местах. Такая неопределенность потребует поиска специальных решений для предупреждения образования вторичной критической массы и организации теплоотвода в местах возможного скопления расплава.

Опасность образования вторичной критической массы усугубляется существенно большей загрузкой ядерного топлива в реакторе со свинцовым теплоносителем и неизбежным процессом сепарации расплава от легких компонентов конструкционных материалов за счет всплытия. Указанные особенности поведения расплава в свинцовом реакторе могут серьезно осложнить конструкцию реакторной установки независимо от типа компоновочных решений (блочная, моноблочная).

Конструкционные материалы

Для быстрых реакторов выбор конструкционных материалов не представил особых трудностей, поскольку ориентация на нержавеющую сталь оправдалась представительными проверками на экспериментальных реакторах. Специальный поиск конструкционных материалов потребовался для кожухов ТВС и оболочки твэла. По мере увеличения выгорания ядерного топлива требования к материалам этих элементов по тепловой и радиационной стойкости возрастают. Поэтому поиск более теплорадиационно-стойких материалов ТВС будет продолжаться и впредь.

Для быстрых реакторов со свинцовым теплоносителем выбор конструкционных материалов, включая представительные испытания и аттестацию, будет нелегкой задачей. На это указывает опыт выбора материалов для контура с эвтектическим сплавом свинец-висмут. Присущие свинцу эрозионная и коррозионная активность, стимулирование переноса железа через защитную оксидную пленку и др., сильная зависимость этих особенностей от температуры усложняют выбор и соответствующее обоснование. Конструкционные материалы для ТВС со свинцовым охлаждением являются

самостоятельной проблемой, поскольку для их выбора и обоснования нужны представительные экспериментальные исследования с имитацией рабочих условий по температуре, флюенсу нейтронов, гидродинамическим воздействиям.

Финансовые затраты

Как и в случае освоения натриевого теплоносителя, большая часть затрат при освоении свинцового теплоносителя, безусловно, будет связана с экспериментальными исследованиями материалов, испытаниями конструкционных узлов, опытных образцов оборудования и систем, технологией поддержания качества свинцового теплоносителя. Вследствие более высокого исходного уровня температуры в случае свинца (более 370 °С) проведение экспериментов заведомо будет более сложным, следовательно, и более дорогим по сравнению с натрием и эвтектическим сплавом свинец-висмут. Как уже отмечалось, в нашей стране затраты на создание и освоение реакторов-размножителей с натриевым теплоносителем оцениваются примерно в 12 млрд дол. Нет оснований думать, что освоение свинцового направления потребует меньших затрат. Напротив, изложенные соображения свидетельствуют о том, что эти затраты существенно возрастут.

Таким образом, развитие и совершенствование реакторов-размножителей является актуальной задачей, поскольку крупномасштабная атомная энергетика невозможна без их включения в ее структуру. Перспективное развитие этих реакторов должно проводиться на базе натриевого теплоносителя. Совокупность его свойств, определяющих теплотехнические и конструктивные характеристики реакторной установки, не достигаются при использовании других известных теплоносителей, в том числе и свинца. Единственный недостаток натрия – пожароопасность – успешно преодолевается техническими мероприятиями, что подтверждается многолетней эксплуатацией реакторов БН-350 и БН-600. Переход на свинцовый теплоноситель не обеспечит каких-либо новых потребительских качеств, реализация которых была бы невозможна с натриевым теплоносителем. Одной из приоритетных задач является повышение технико-экономических характеристик установок с быстрыми реакторами с натриевым теплоносителем, обеспечение их конкурентоспособности с реакторными установками ВВЭР. Проведенные к настоящему времени разработки показывают реальные направления решения этой задачи.

Заключение научно-технической экспертизы проекта БРЕСТ-ОД-300

1. Введение

Считается, что в настоящее время атомная энергетика находится на завершающем этапе своего становления. Достаточно надежно освоены тепловые реакторы типа ВВЭР. Но этого недостаточно для развития большой атомной энергетике (БАЭ), поскольку она реальна только при наличии в ее структуре реакторов-размножителей и замкнутого топливного цикла.

Опыт создания реакторов-размножителей в мире имеется. Он включает глубокие теоретические и экспериментальные исследования, создание большого числа экспериментальных и демонстрационных реакторов-размножителей. Наиболее представителен, безусловно, опыт России, поскольку еще в СССР были созданы и успешно эксплуатировались два коммерческих реактора-размножителя. Один из них (БН-350) уже выведен из эксплуатации, отработав назначенный ресурс с превышением на пять лет, другой (БН-600) продолжает успешно эксплуатироваться с 1981 года.

Все указанные реакторы (и экспериментальные, и коммерческие) при всем разнообразии проектных и конструкторских решений объединяет одно – выбор натрия в качестве теплоносителя. Рассматриваемый проект БРЕСТ-ОД-300 отличается как раз выбором теплоносителя, в качестве которого предлагается свинец.

Как и в любой области техники, появление новых решений в атомной энергетике является необходимым условием ее поступательного прогрессивного развития. Но в интересах такого развития следует различать два существенно разных подхода. В одном случае совершенствование, технико-экономическая оптимизация достигаются при сохранении базовых решений, оправдавших себя в процессе эксплуатации – *эволюционное* развитие. В другом случае имеет место кардинальное изменение базовых решений со всеми вытекающими последствиями для оборудования и систем – *революционное* решение.

Второй подход в технике обычно реализуется, когда практически исчерпаны возможности эволюционного совершенствования и невозможно выполнение новых требований заказчика за счет модернизации оборудования существующих систем.

Проект БРЕСТ, безусловно, является примером революционного подхода к решению проблемы, поскольку многолетний мировой и отечественный опыт создания реакторов типа БН при этом отвергается. Поиск приемлемых конструктивных решений должен проводиться «с нуля» из-за отсутствия какого-либо опыта в использовании свинцового теплоносителя.

Учитывая грандиозность такой работы, принятие решения о ее проведении можно оправдать только стратегической значимостью новых потребительских качеств, которые получит общество при создании реакторов типа БРЕСТ.

При этом должно быть показано, что предполагаемые новые качества не могут быть обеспечены при дальнейшем совершенствовании реакторов типа БН. К сожалению, авторы проекта не уделили должного внимания этим вопросам, ограничившись напоминанием, что в отличие от натрия свинец не горит, и утверждениями, что в реакторе БРЕСТ реализуется так называемая *естественная безопасность*, конструктивно все решается проще и дешевле, чем в реакторах типа БН и ВВЭР, включая и проблему нераспространения. Потенциальные возможности технико-экономического совершенствования реакторов типа БН остались без должного внимания.

2. О естественной безопасности реактора БРЕСТ

Авторы проекта большие надежды связывают с «естественной безопасностью реактора. По мнению авторов, естественная безопасность является тем исходным принципом, который позволит вдвое снизить стоимость энергоблока, поскольку она (стоимость) якобы определяется в основном требованиями безопасности. В связи с этим авторы намеревались достигнуть повышения безопасности за счет отказа от потенциально опасных решений и использования природных закономерностей, что, по их мнению, позволит упростить конструкцию оборудования и отказаться от дополнительных систем безопасности.

В этих утверждениях обращает на себя внимание обещание отказаться от опасных решений и использовать при проектировании природные закономерности. Но ведь эти положения являются само собой разумеющимися для проектантов любых технических систем, а попытки создавать какую-либо систему вопреки законам природы, используя опасные решения, представляются невероятными. Реализация опасных решений является, как правило, результатом недостаточного знания.

Целесообразно раскрыть фактическое содержание введенного авторами понятия *естественная безопасность*, используя проектные материалы и публикации, относящиеся к реактору БРЕСТ. При проектировании систем безопасности в соответствии с принципом «естественная безопасность» предполагается:

- детерминированное исключение тяжелых аварий;
- выбор наиболее тяжелой (максимальной) проектной аварии, перекрывающей по масштабам последствий любые другие, включая ошибки персонала;
- запас реактивности не более в на всех режимах работы;
- наличие запасов по температуре теплоносителей, топливной композиции до фазовых переходов;
- надежный теплоотвод от активной зоны во всех возможных аварийных ситуациях;
- наличие стабилизирующих обратных связей по температуре, расходу теплоносителя;
- отрицательный пустотный эффект реактивности;
- баланс радиоактивности между извлекаемым из Земли ураном и захораниваемыми радиоактивными отходами.

Из рассмотрения этого перечня, составляющего содержание введенного понятия *естественная безопасность*, можно видеть, что за исключением последнего положения, непосредственно не относящегося к реакторной установке, в нем не содержится ничего принципиально нового, качественно отличающегося от тех положений, которыми традиционно руководствуются проектанты установок с быстрым реактором и натриевым теплоносителем.

Однако здесь уместно привести некоторые уточнения.

Акцентация авторов на детерминированное исключение тяжелых аварий неправомерна. Детерминированный подход предполагает точное знание всех параметров, описывающих конструкцию, процессы и т. д. Практически так не бывает не только потому, что проектант не располагает всей полнотой знания, но и потому, что природе вещей свойственна некоторая неопределенность. Поэтому необходимо помнить, что детерминированное описание всегда условно. Эта условность и диктует необходимость варьирования параметров и вероятностного анализа, что особенно важно при оценке безотказности оборудования и риска.

Президент Международного союза теоретической и прикладной механики Д.Лайтхилл в 1986 г. заявил: «Нас не покидает коллективное желание признать свою вину за то, что мы вводили в заблуждение широкие круги образованных людей, распространяя идеи о детерминировании систем, удовлетворяющих законам движения Ньютона, – идеи, которые, как выяснилось после 1960 г., оказались

неправильными». И еще одно высказывание на эту тему: «Детерминизм, долгое время казавшийся символом научного познания, в настоящее время сведен до положения свойства, справедливого только в ограниченном круге ситуаций» (И. Пригожин).

В связи с выбором максимальной проектной аварии следует напомнить, что по рекомендации МАГАТЭ в национальные нормативы по безопасности внесено положение о постулированной аварии, которое предписывает, что в тех случаях, когда невозможно достоверно обосновать нереализуемость в конкретной конструкции реактора аварии, приводящей к тяжелым последствиям для окружающей среды, следует постулировать расплавление активной зоны и доказать, что принятые проектные решения исключают недопустимые воздействия последствий такой аварии на окружающую среду и население. Представляется, что такой подход однозначно решает вопрос о максимальной аварии.

Обеспечение в реакторе условий, при которых запас реактивности не будет превышать β в течение всего периода работы, пустотный эффект реактивности отрицателен, а коэффициент воспроизводства в активной зоне $K_{\infty} \approx 1$, безусловно, желательно. Это относится в равной мере к реакторам как со свинцовым теплоносителем, так и с натриевым.

Однако практическая реализуемость указанных условий требует тщательного исследования. При этом необходимо корректно учитывать точность обеспечения топливной загрузки, стабильность нуклидного состава топлива, характеристики обратных связей, спектр режимов работы и скорости их изменений.

Однотипность задач, подлежащих решению, для обоих типов быстрых реакторов очевидна. Однако следует заметить, что в случае свинцового теплоносителя узким местом является недостаточное знание сечений свинца и его примесей для нейтронов различных энергий, что может свести «на нет» достаточно корректное решение перечисленных задач.

Это же утверждение можно повторить по отношению к задаче создания активной зоны с более плотным топливом, чем диоксид урана или плутония, и достаточно глубоким выгоранием. Для обоих типов реактора решение задачи связывается с нитридным топливом. Затраты на отработку нитридной зоны для реактора с натриевым теплоносителем будут, конечно, значительно меньше по сравнению со свинцовым теплоносителем, поскольку материалы активной зоны, режимы работы известны и отработаны, имеются экспериментальные стенды и экспериментальный реактор.

Вопрос о запасе по температуре фазового перехода для теплоносителя и топлива требует специального рассмотрения, поскольку

есть основания полагать, что из условий безопасности существует оптимальное значение запаса по температуре фазового перехода теплоносителя. Например, в случае тяжелых аварий, приводящих к перегреву активной зоны, температурное состояние твэлов и конструкционных материалов реактора будет существенно различно для свинцового и натриевого теплоносителей. Действительно, при температуре плавления оболочки твэла (сталь) ~ 1450 °С в кипящем натрии ($T_{\text{кип}} < 883$ °С) оболочка твэла и другие конструкционные материалы реактора не плавятся, но интенсифицируется теплоотдача от топлива. В свинцовом теплоносителе оболочка твэла и другие конструкционные материалы реактора расплавятся задолго до того, как свинец закипит ($T_{\text{кип}} < 1737$ °С).

Перечень систем безопасности для быстрого реактора со свинцовым теплоносителем, который разработчик БРЕСТ-ОД-300 предусматривает, руководствуясь принципом естественной безопасности, практически аналогичен перечню для быстрого реактора БН-600, который проектировался по традиционной схеме, а именно:

- *защитные системы* – системы аварийного расхолаживания, система аварийной защиты реактора, система защиты от превышения давления газа в реакторе, система аварийного сброса пара при течах в парогенераторе, система защиты от превышения давления газа во втором контуре, система обнаружения течи парогенераторов;
- *локализирующие системы* – страховочный корпус реактора (железобетонная шахта), страховочные кожухи на вспомогательных натриевых трубопроводах и оборудовании первого контура, система предотвращения выхода радиоактивных газов и аэрозолей в обслуживаемые помещения и окружающую среду;
- *обеспечивающие системы* – система надежного производственного водоснабжения и электроснабжения систем безопасности, пожаротушения кабельных помещений систем безопасности, управляющих систем безопасности (по номенклатуре защитных, локализирующих и обеспечивающих систем безопасности).

Сравнение с реакторами типа БН показывает, что составы систем безопасности реакторов обоих типов совпадают, за исключением системы пожаротушения натрия, которая является одной из важнейших во всех проектах реакторов типа БН.

Заметим, что нельзя считать вполне обоснованным исключение такой системы и для свинцового теплоносителя. Известно, что воспламенение расплавленного свинца не исключается, реакция окисления свинца экзотермическая, поэтому в аварийных условиях реактора нельзя исключить самоподдерживающегося разогрева свинца.

Подводя итог сказанному, следует констатировать, что понятие естественная безопасность нового содержания практически не несет. И в случае свинцового теплоносителя, как и в случае натриевого, безопасность реактора достигается за счет целенаправленного выбора схемных и конструктивных решений, резервирования части оборудования и систем, реализации необходимых обратных связей (по знаку и значению), применения самосрабатывающих защитных устройств и физических барьеров на путях возможного распространения радиоактивных продуктов при тяжелых авариях.

3. О методологии создания нового реактора

Международная практика придерживается определенных канонов при создании реакторных установок нового типа. Они включают:

- принципиальное обоснование целесообразности создания реакторной установки нового типа; основу обоснования составляет перечень новых потребительских качеств, оценка их значимости и анализ невозможности их реализации в существующих установках и при их модернизации;
- обоснование технической реализуемости проекта новой установки в рамках действующих нормативов;
- разработку программ НИР и ОКР, необходимых для создания установки;
- оценку стоимости и сроков разработки проекта, включая НИР и ОКР.

Предлагаемая стадийность реализации проекта:

- создание экспериментального реактора и его эксплуатация (по мировому опыту тепловая мощность такого реактора – до 70 МВт);
- корректировка проекта с учетом опыта создания и эксплуатации экспериментального реактора;
- сооружение демонстрационной реакторной установки;
- создание коммерческой установки с учетом опыта сооружения и эксплуатации демонстрационной установки.

Очевидно, что изложенная методология создания реакторной установки нового типа сводит к минимуму риск неоправданных финансовых вложений. Можно привести впечатляющие примеры, показывающие, что отступления от этой методологии, как правило, не оправдываются.

Имеющийся опыт создания реакторных установок с различными теплоносителями (вода, натрий, эвтектика Pb-Bi, гелий) однозначно свидетельствуют об определяющей роли теплоносителя при выборе

схемных и конструктивных решений, используемых материалов и обосновании эксплуатационных режимов. Поэтому при разработке проекта установки со свинцовым теплоносителем не следует отступать от установившихся канонов. Слишком велик риск неоправданных затрат.

4. О конструктивных решениях

В установке БРЕСТ использована блочная компоновка основного оборудования, хорошо зарекомендовавшая себя в корабельных реакторных установках. При обосновании надежности блочной компоновки на критическом пути находится сварное соединение парогенераторных патрубков с корпусом реактора, поскольку при этом должно быть обеспечено свободное перемещение парогенераторов при температурных изменениях, высокое качество сварного шва при минимальных остаточных сварочных напряжениях, поскольку отжиг такого сварного шва невозможен.

В ОКБМ с участием ЦНИИ КМ «Прометей» при экспериментальной отработке такого соединения были проведены натурные ресурсные испытания с полной имитацией штатных условий в соответствии с моделью эксплуатации. По-видимому, этого не избежать и проектанту БРЕСТ.

Конструкции и основное оборудование (реактор с активной зоной, органы управления и защиты с приводами, парогенераторы, главные циркуляционные насосы и др.) в проекте не подкреплены представительными экспериментами. Ссылки на соответствующее оборудование корабельных установок с теплоносителем Pb-Bi не могут быть приняты во внимание, поскольку температурные условия их работы существенно различаются (на 200 °С), а модели эксплуатации несопоставимы. Следует учитывать исключительную сложность условий работы оборудования со свинцовым теплоносителем (коррозионные, эрозийные процессы, гидродинамическое нагружение, возможность кавитационных процессов и др.). Дальнейшее проектирование оборудования можно вести, только опираясь на представленные экспериментальные исследования.

Особого внимания заслуживают процессы отложения свинца и его окислов в зазорах, образуемых подвижными элементами конструкций. Отработка условий, исключающих или хотя бы значительно уменьшающих конденсацию паров свинца в зазорах, отложения оксидов, потребует сложных и дорогостоящих стендов.

В этом плане неординарной задачей при разработке активной зоны будет, с одной стороны, поиск обоснованного решения надежной механической фиксации ТВС, исключаяющего ее всплытие при

работе реактора, с другой – гарантирующего выгрузку ТВС после многолетнего пребывания в свинце при температуре более 400 °С.

Обработка режимов поддержания кислородной активности свинцового теплоносителя также требует представительных стендовых испытаний, в максимальной степени имитирующих рабочие условия, в частности, по скорости теплоносителя и соотношению объема протекающего теплоносителя и площади омываемых поверхностей.

В проекте схемой реакторной установки не предусматривается промежуточный контур между реактором и парогенераторами. Промежуточный контур в установках БН практически исключает контакт радиоактивного натрия первого контура с водой и паром при нарушении герметичности трубок парогенератора и, тем самым, исключается также динамическое воздействие высокого давления пара (более 180 МПа) на активную зону.

Хотя химическое воздействие пара и воды со свинцом не имеет таких радиационных последствий как в случае взаимодействия с радиоактивным натрием, однако остается опасность динамического воздействия на активную зону давления воды-пара (более 250 МПа) при разгерметизации трубок парогенератора. Конструктивные решения реактора БРЕСТ в этом отношении вызывают сомнения и, безусловно, должны подтверждаться представительным экспериментом. Отказ от промежуточного контура, скорее всего, является потенциально опасным решением.

Если при проектных решениях нельзя будет убедительно доказать физическую невозможность расплавления активной зоны, то максимальная авария будет совпадать с постулированной аварией (расплавление активной зоны) согласно рекомендации МАГАТЭ. Анализ такой аварии сведется к решению двух задач: недопущение образования вторичных критических масс и обеспечение теплоотвода от расплава при сохранении целостности корпуса реактора.

В реакторах типа БН решение первой задачи достигается за счет организации определенной конфигурации расплава в нижней части корпуса для гарантированного исключения критичности. При этом теплоотвод от расплава исключает перегрев и повреждение корпуса реактора (проект БН-800).

В случае реактора со свинцовым теплоносителем удельная масса расплава активной зоны будет меньше удельной массы свинца. Поэтому однозначно определить место скопления расплава весьма затруднительно, и не исключается его скопление в различных местах и даже за пределами реактора. Такая неопределенность потребует специальных конструктивных решений как для исключения образова-

ния вторичных критмасс, так и для организации теплоотвода в местах возможного скопления расплава. Заметим, что опасность образования вторичных критмасс в реакторах типа БРЕСТ усугубляется существенно большей загрузкой ядерного топлива и неизбежным процессом сепарации расплава от относительно легких компонентов конструкционных материалов за счет всплытия.

Конструктивные решения по отдельному оборудованию и системам РУ БРЕСТ детально рассмотрены специалистами по соответствующему оборудованию, в том числе специалистами ОКБМ.

5. О конструкционных материалах

Используемые в проекте материалы не аттестованы в соответствии с ГОСТ и не имеют представительного обоснования. Нет ясности и в отношении чистоты используемого свинца в качестве теплоносителя, состава остающихся в нем примесей, что важно для нейтронно-физических расчетов, определения радиоактивности теплоносителя и радиационных последствий при течах свинца. От степени чистоты свинца существенно зависит его стоимость.

Учитывая особенности свинца (коррозионно-эрозионная активность, адсорбция свинца сталями, преодоление защитных окисных пленок, склонность к образованию оксидов, сильная зависимость отмеченных процессов от температуры и др.), все используемые конструкционные материалы должны пройти через этапы представительного экспериментального подтверждения с учетом назначенного ресурса для соответствующего оборудования.

В проекте весьма важная роль возлагается на шахту, в которой размещается реактор, поскольку она выполняет функцию и страховочного корпуса на случай разгерметизации реактора. Учитывая, что шахта относится к числу незаменимых конструкций, а условия ее работы достаточно сложны даже при нормальной эксплуатации, ориентация на такое решение и используемый бетон требует проведения всесторонних исследований и ресурсных испытаний материала с полной имитацией штатных условий, включая размещение нагревателей, изоляции, теплоотвода.

6. Сравнение теплоносителей Na и Pb

Учитывая, что на быстрые реакторы-размножители независимо от вида теплоносителя в структуре большой атомной энергетики возлагаются одни и те же функции, целесообразно сравнить влияние

теплоносителей в первую очередь на основные характеристики активной зоны, поскольку ее конструктивные особенности, нейтронно-физические и теплотехнические характеристики определяют в значительной мере схемные и конструктивные решения реакторной установки и вопросы безопасности. Ниже эти характеристики представлены в относительных единицах:

Показатель	БН-800 (натрий)	БРЕСТ-ОД-300 (свинец)
Удельная загрузка делящегося материала	1	1,9
Теплонапряженность	1	0,4
Коэффициент теплоотдачи в ТВС	1	0,17
Объемная доля топлива	1	0,6
Макросечения замедления теплоносителя	1	0,27
Макросечения поглощения нейтронов в теплоносителе	1	2,29

Из сравнения приведенных характеристик следует, что по теплофизическим и нейтронно-физическим параметрам, а также экономическим показателям реактор со свинцовым теплоносителем всегда будет существенно уступать реактору типа БН при любых реализуемых конструктивных решениях. Следствием этого являются увеличение габаритов реактора со свинцовым теплоносителем, снижение на 40–50 °С максимально допустимой температуры свинца на выходе из активной зоны при заданной максимальной температуре оболочки твэла и соответствующее снижение температуры вырабатываемого пара.

В этих условиях основаниями для перехода на свинцовый теплоноситель могут быть: либо новые потребительские качества, которые реакторами типа БН не могут быть обеспечены; либо значительные преимущества по капитальным и эксплуатационным затратам. Однако из материалов проекта невозможно усмотреть каких-либо новых потребительских качеств реактора БРЕСТ.

Экономические характеристики проекта и их сравнение с характеристиками реакторных энергоисточников других типов должны быть предметом объективного анализа специалистов.

7. Экономические замечания

Затраты СССР на становление и развитие направления быстрых реакторов-размножителей оцениваются порядка 12 млрд дол. США (при общих мировых затратах в ~50 млрд дол.).

Эти затраты позволили выполнить большой объем теоретических, экспериментальных исследований, создать несколько экспериментальных реакторов, выполнить необходимые конструкторские, проектные разработки и соответствующий объем ОКР, то есть создать базу для развития этого направления. Конечным результатом было создание двух опытно-промышленных реакторов: БН-350 с петлевой компоновкой оборудования первого контура и БН-600 с интегральным реактором.

Накопленный опыт создания и эксплуатации реакторов типа БН позволил перейти к технико-экономической оптимизации, которая при создании первых реакторов не была первоочередной задачей. Выполненные проектные разработки и исследования позволили определить эффективные направления и средства такой оптимизации. Часть из них реализована в проекте БН-800, что позволило вплотную приблизиться по удельным капитальным затратам к ВВЭР-1000 — отставание не превышает 11 %. Видны дальнейшие пути и средства технико-экономической оптимизации реакторов БН. Это, в частности, переход к корпусным парогенераторам, увеличение выгорания топлива до 15 % т.а. и более, снижение металлоемкости реактора и оборудования.

Нет никаких оснований полагать, что реализация реакторного направления со свинцовым теплоносителем потребует меньших затрат и времени по сравнению с направлением БН. Напротив, имеются основания считать, что потребуются существенно большие затраты, учитывая особенности свинца и необходимое усложнение испытательных стендов.

Особого обсуждения заслуживает предложение о создании при каждой АЭС с реакторами БРЕСТ производства топливного цикла. Представляется, что оно не упростит, а усложнит решение проблемы нераспространения в связи с возрастающей при этом делокализацией специализированных производств по переработке отработавшего топлива и, как следствие, — потенциальной возможностью хищений ядерных делящихся материалов.

Выводы

1. Проект энергоблока с реактором БРЕСТ-ОД-300 рассматривается авторами как демонстрационный образец энергоблока с реактором-размножителем нового типа, который в перспективе должен играть

определяющую роль в большой атомной энергетике вместо реакторов типа БН.

2. Принципиальной особенностью реактора БРЕСТ является использование свинца в качестве теплоносителя вместо натрия, который ранее мировым сообществом ученых и специалистов был выбран для создания реакторов-размножителей.

3. Авторы проекта не приводят системного обоснования необходимости развития альтернативного направления создания реактора-размножителя нового типа. Это не может не удивлять, поскольку предлагается пренебречь многолетним опытом создания экспериментальных, демонстрационных и коммерческих реакторов типа БН, их успешной многолетней эксплуатацией и той фундаментальной научно-технической базой, на которой и основывается прогрессивное развитие этого направления.

Нельзя, конечно, забывать и о том, что на создание этой базы страна потратила колоссальные средства. Поэтому фактический призыв забыть об этом опыте и начать все «по новой» не может встретить понимание у добросовестных исследователей и специалистов без серьезного системного обоснования.

4. В проекте не приводится информация о каких-либо новых потребительских качествах, которые не могут быть реализованы в реакторах типа БН.

5. По существу единственной мотивацией, приводимой авторами в обоснование создания реактора БРЕСТ, является то, что используемый в качестве теплоносителя свинец проявляет существенно меньшую химическую активность при контактах с воздухом и водой по сравнению с натрием. Но это свойство не может определять выбор теплоносителя, поскольку многолетняя эксплуатация реакторов типа БН показывает, что предусмотренные технические решения надежно исключают сколько-нибудь масштабные проявления химической активности натрия при течах.

6. Теплофизические свойства свинца существенно уступают свойствам натрия, что неизбежно приводит к увеличению размеров реактора и другого оборудования, а также к снижению термодинамического КПД энергоблока.

7. Предлагаемая методология освоения нового реакторного направления не выдерживает критики: начинать с создания демонстрационного энергетического реактора недопустимо. Мировой опыт подтверждает установившиеся каноны, согласно которым созданию демонстрационного реактора предшествует достаточно длительный путь прохождения экспериментальных исследований, включая создание экспериментальных реакторов и их эксплуатацию.

Демонстрационный реактор, каким является БРЕСТ-ОД-300, отнюдь не исследовательский, как это справедливо подчеркнуто и в его названии. Получение на нем недостающей информации невозможно. Его назначение подтвердить, что предварительные исследования, испытания проведены качественно и в необходимом объеме.

8. Рассматриваемый проект не базируется на сколько-нибудь представительных экспериментальных результатах. Учитывая, что он не имеет также каких-либо реализованных прототипов оборудования со свинцовым теплоносителем, его ни в коей мере нельзя рассматривать как технический проект и не следует рекомендовать к утверждению.

9. В случае дальнейшей разработки направления БРЕСТ первоочередной задачей должна быть разработка программы НИР и ОКР с указанием сроков выполнения и предполагаемых затрат. НИР и ОКР должны включать весь комплекс работ начиная с определения нейтронных сечений свинца и содержащихся в нем примесей и заканчивая созданием, эксплуатацией экспериментального реактора.

Есть все основания полагать, что стоимость этих работ будет превышать аналогичные затраты на НИР и ОКР для натрия, поскольку большая часть стендов должна будет создаваться на более высокий, по сравнению с натрием, исходный уровень температуры ($\Delta T=250-300$ °C).

10. Исключение промежуточного контура имеет принципиальное значение по условиям безопасности и требует представительного обоснования с учетом всех эксплуатационных состояний: нормальная эксплуатация, профилактическое обслуживание, аварийные состояния, проведение ремонтных работ. Для этого необходимо, в частности, знание чистоты свинца и всех содержащихся в нем примесей.

11. Анализ безопасности при максимальной аварии должен опираться на представительные экспериментальные исследования, включая подтверждение ресурсной надежности страховочной шахты.

12. Техничко-экономический анализ проекта должен проводиться с учетом замечаний, отмеченных в экспертных заключениях.

Заключение

Учитывая, что реакторы типа БРЕСТ не обеспечивают каких-либо новых потребительских качеств, не реализуемых в реакторах типа БН, а выполнение необходимых НИР и ОКР для их обоснования и создания потребует весьма больших затрат и времени, считаю, что продолжение работ по реакторному направлению типа БРЕСТ не может быть обосновано техническими и экономическими соображениями.

Опыт эксплуатации и проектирования быстрых реакторов в СССР¹

Введение

За более чем 20-летний период работы над быстрыми реакторами с натриевым охлаждением в СССР накоплен значительный опыт, позволивший приступить к созданию первых АЭС с реакторами: БН-350 и БН-600. Проектирование и строительство этих реакторов вызвало необходимость создания обширной экспериментальной базы для физических, теплотехнических, технологических, материаловедческих и других исследований и для испытания оборудования реакторов. Особо важную роль в экспериментах играют опытные быстрые реакторы БР-5 и БОР.

В предлагаемом докладе сообщается состояние дел по эксплуатации существующих и строительству промышленных быстрых реакторов в нашей стране, в частности, опыт испытания оборудования для строящихся АЭС с быстрыми реакторами. Пуск в эксплуатацию БН-350, а затем БН-600 даст в ближайшие годы крупный промышленный опыт по реакторам этих двух типов. Этот опыт позволит нам уже в этом десятилетии приступить к более широкому строительству АЭС с быстрыми реакторами на основе освоенного промышленностью оборудования БН-600, которые, мы надеемся, смогут производить электроэнергию экономически выгодным путем.

Дальнейшая перспектива быстрых реакторов в нашей стране связывается с реакторами большей мощности — 1000 МВт и более. Конструкторские проработки таких реакторов проводятся у нас, они убеждают в возможности создания быстрых реакторов такой мощности, основываясь на принципах конструкции, заложенных в первые реакторы. Уже существующий опыт проектирования и эксплуатации указывает на существование путей заметного улучшения технико-экономических показателей и надежности быстрых реакторов. Однако практическая реализация реакторов большой мощности с этими

¹ Доклад на Четвертой Международной конференции ООН по мирному использованию атомной энергии, Женева, Швейцария, 6–16 сентября 1971 г. Авторы: А.И.Лейпунский, О.Д.Казачковский, Ф.М. Митенков, В.В.Орлов, В.В.Стекольников, В.И.Ширяев. Печатается с сокращениями

усовершенствованиями должна явиться следующим шагом после строительства, освоения и накопления опыта работы первых промышленных АЭС с быстрыми реакторами во второй половине этого десятилетия.

В настоящем докладе не рассматриваются вопросы топлива, отраженные в других докладах настоящей конференции.

Реактор БР-5

В январе 1971 г. исполнилось 12 лет со дня пуска реактора БР-5.

В 1959–1964 гг. реактор работал на окисном плутониевом горючем, с 1965 г. в активной зоне реактора стоят тепловыделяющие элементы из монокарбида урана. Несмотря на то, что окисные тепловыделяющие элементы были спроектированы всего на 2 % выгорание, а монокарбидные – на 3 % выгорание, большинство тепловыделяющих элементов из двуокиси плутония достигли выгорания до 5,0–6,7 %, а тепловыделяющие элементы из монокарбида урана – до 4,0–5,9 %. Установлено, что большая часть монокарбидных тепловыделяющих элементов с оболочкой из стали ОХ18Н9Т потеряла герметичность при выгорании 4,0–4,6 %, тогда как все монокарбидные тепловыделяющие элементы с оболочкой из стали Х16Н15МЗБ сохранили работоспособность до выгорания 5,5–5,9 %. Причиной выхода из строя тепловыделяющих элементов из двуокиси плутония было распухание топлива и уменьшение пластичности стальной оболочки при облучении. Причиной разрушения оболочки монокарбидных топливных элементов явилось ухудшение теплоотвода от деформировавшихся тепловыделяющих элементов за счет окружной неравномерности температурного поля и худшие характеристики по длительной прочности стали ОХ18Н9Т по сравнению со сталью Х16Н15МЗБ.

В 1967–1969 гг. в активной зоне реактора было проведено облучение восьми опытных поглощающих элементов с бор содержащими элементами (B_4C , CrB_2 , EuB_6 и др.) и Та, в том числе элементов негерметичной конструкции. Элементы набрали дозу нейтронного облучения $3 \cdot 10^{21}$ н/см². При исследовании пэлов в «горячей» лаборатории установлена их хорошая работоспособность.

Значительное время реактор работал с частью тепловыделяющих элементов, потерявших герметичность, что приводило к выходу продуктов деления в теплоноситель и газовые полости первого контура. В этих условиях большое значение придавалось контролю за содержанием продуктов деления в первом контуре и контролю герметичности тепловыделяющих элементов, выгружаемых из реактора.

На реакторе созданы системы и отработаны методы по контролю состояния активной зоны (по активности запаздывающих нейтронов и продуктов деления в теплоносителе).

Периодически проводилась очистка натрия первого контура от радиоактивных продуктов деления с помощью холодной ловушки окислов, которая хорошо улавливает иод и цезий. На установке создана и испытана система очистки аргона первого контура от газообразных радиоактивных продуктов деления с помощью угольного адсорбера. За несколько часов очистки уровень активности снижается до равновесного значения, когда унос ксенона компенсируется притоком из натрия. На реакторе БР-5, где 70 ± 5 % ксенона находится в натрии [1], на первой стадии очистки активность ксенона в аргоне снижается в десятки раз, в дальнейшем происходит очистка натрия от ксенона.

Следует отметить высокую радиоактивность ловушек паров натрия, установленных в системе очистки газа. Установлено, что содержание цезия-137 в натрии, сконденсированном из паров, в 20 раз выше, чем в теплоносителе первого контура.

Начиная с 1969 г. начался регулярный контроль за содержанием неметаллических и металлических примесей в натрии первого контура. Всего за последние два года было отобрано из контура семь проб натрия. Установлено высокое содержание углерода в теплоносителе ($0,45 \cdot 10^{-2} - 1,7 \cdot 10^{-2}$)%. Возможным источником углерода в контуре является смазка подшипников циркуляционных насосов. Содержание азота в натрии находится в пределах $(1-3) \cdot 10^{-3}$ %, водорода $(0,4-2) \cdot 10^{-3}$ %.

Эксплуатацию реактора БР-5 на монокарбидной активной зоне предполагается завершить в первом полугодии 1971 г. В течение 1971—1972 гг. намечено на реакторе БР-5 провести ряд мероприятий с целью увеличить его мощность до 10 МВт. Наряду с увеличением мощности реактора вдвое предполагается в качестве третьей загрузки реактора применить окисное плутониевое топливо с достижением выгорания в тепловыделяющих элементах до 10 % и теплонапряженности до 780 кВт/л. Форсирование реактора БР-5 будет осуществлено за счет увеличения подогрева теплоносителя в реакторе при сохранении средней температуры натрия на выходе из активной зоны 500 °С, что позволит в 3—4 раза ускорить исследования, связанные с облучением топлива и материалом в реакторе.

Реактор БОР

В конце 1969 г. в Мелекесе* (СССР) осуществлен энергетический пуск исследовательского реактора на быстрых нейтронах БОР мощностью 60 МВт [2]. С вводом в эксплуатацию этого реактора существенно расширились возможности для проведения экспериментальных исследований в области физики и технологии реакторов на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем. Имея высокие максимальные параметры (удельная мощность — до 1100 кВт/л, температура натриевого теплоносителя до 600 °С), реактор БОР позволит в широком масштабе проводить испытания различных топливных материалов и композиций поглощающих элементов СУЗ, конструкционных материалов при больших интегральных потоках нейтронов. Наряду с этим, реактор БОР позволит провести экспериментальную проверку и отработку отдельных вопросов проектирования систем и оборудования энергетических реакторов на быстрых нейтронах.

Сооружение реактора БОР было произведено в короткие сроки (начало проектирования — 1963 г., ввод в эксплуатацию — 1969 г.). За это время накоплен большой опыт по проектированию, изготовлению оборудования, монтажу и пуску реактора [3]. Все основные узлы реактора (уплотнения вращающихся пробок, патрубки корпуса, напорная камера, приводы и механизмы СУЗ, топливные сборки и т. д.), основное оборудование (насос, парогенератор, промежуточные теплообменники, арматура и т. д.), приборы (уровнемеры, манометры, термометры) подвергались испытаниям на моделях и прототипах. Перед монтажом реактора была произведена контрольная сборка корпуса реактора, поворотных пробок, коллектора, макетов топливныхборок, приводов СУЗ и т.д. При выполнении монтажных работ большое внимание было обращено на обеспечение качества сборки реактора и основных контуров, соблюдение принятой технологии и чистоты монтажа.

Натриевые контуры после монтажа никаким водным промывкам не подвергались. Сушка и обезгаживание основных контуров производилась вакуумированием с одновременным разогревом оборудования и трубопроводов до температуры 200–250 °С. В процессе сушки натриевые контуры периодически заполнялись чистым аргоном. Предельный вакуум, достигнутый в первом контуре, был $2 \cdot 10^{-1}$ мм рт.ст., натекание — $0,8 \cdot 10^{-1}$ мм рт.ст. в час.

На реакторе БОР была отработана новая технология подготовки натрия для заполнения контуров, без его дистиллирования, как это делалось на реакторе БР-5. Из каждой транспортной емкости с натрием, объем 1 м³, производилась отгонка парафина под вакуумом

* С 1973 г. — Димитровград

в течение трех часов при разогреве натрия в емкости до 200–250 °С. После этого натрий из транспортной емкости передавливался аргоном через механический сетчатый фильтр в промежуточный бак емкостью 6 м³, где натрий отстаивался некоторое время, а затем передавливался в приемный бак емкостью 35 м³. Окончательная очистка натрия производилась циркуляцией его через холодную ловушку. Содержание основных примесей в исходном натрии: углерод – $4,5 \cdot 10^{-3}$ %, водород – $6 \cdot 10^{-4}$ %, азот – $1,5 \cdot 10^{-3}$ %, кальций – $6 \cdot 10^{-3}$ %, калий – $2 \cdot 10^{-2}$ %. Содержание окислов в натрии соответствовало температуре закипания пробкового индикатора $T = 120$ °С.

Заполнение первого контура производилось натрием, нагретым до температуры 250 °С. При этом осуществлялся тензометрический контроль за возникающим напряжением в корпусе аппарата, оборудования и трубопроводах.

Напряжения не превышали допустимые значения. Благодаря принятым мерам по соблюдению чистоты монтажа содержание окислов в натрии после заполнения первого контура поднялось только до $t_{\text{заб}} = 180$ °С. Содержание других примесей практически не отличалось от исходных значений. На сетчатых фильтрах, установленных в трубопроводах контура и в имитаторах сборок твэлов, каких-либо загрязнений обнаружено не было. Полное количество окислов натрия, переведенное в ловушку после заполнения первого контура натрием, загрузки активной зоны и замены арматуры, составило только 2 кг.

Физический и энергетический пуск реактора БОР был осуществлен в конце 1969 г. со съемом теплоты воздушным теплообменником. В течение 1970 г. была выполнена большая программа по исследованию физических, тепловых и гидравлических характеристик установки. Эксперименты по исследованию физических характеристик реактора показали, что все основные физические параметры были предсказаны достаточно точно [4]. Это касается таких величин как критмасса, эффективность органов регулирования, температурный эффект реактивности. Экспериментальные коэффициенты неравномерности тепловыделения и падение реактивности от выгорания оказались несколько ниже расчетных. В целом, хорошее предсказание физических характеристик реактора БОР было обусловлено большим опытом расчетных работ и проведением исследований модели реактора на стенде БФС [5, 6]. Экспериментальная программа на стенде БФС позволила проверить методы и константы для физического расчета и сделать ряд уточнений в предсказанных параметрах, в частности, в эффективности органов регулирования. На реакторе БОР, как и на реакторе БР-5, на первом этапе работы при пониженных температурах натрия и незначительных мощностях накапливался аргон на

поверхностях в активной зоне (до 2–3 л). Эффект проявлялся в изменении реактивности от повышения давления в газовой полости и при повышении расхода теплоносителя. Позднее обнаружено, что эффект отсутствует после работы реактора на большой мощности и в малой мере проявляется после длительных остановок. Повышение расхода теплоносителя от 0 до 800 м³/ч приводит к положительной реактивности ~0,2 %. Анализ радиоактивных примесей в первом контуре реактора свидетельствует о герметичности топливных элементов. Активность натрия при работе реактора на 30 МВт определяется натрием-24 – 38 Ки/кг, после остановки – натрием-22 – $4,7 \cdot 10^{-5}$ Ки/кг, другие радиоактивные изотопы обязаны, в основном, активации примесей натрия, и их общая активность меньше $3 \cdot 10^{-5}$ Ки/кг. В газовой полости активность аргона-41 – $3 \cdot 10^{-3}$ Ки/л, неона-23 – 1 Ки/л, радиоактивные изотопы ксенона и криптоны ($\sim 10^{-6}$ Ки/л) обязаны поверхностному загрязнению твэлов.

Исследования тепловых и гидравлических характеристик реактора также показали на хорошее согласие экспериментальных и проектных параметров. Специальным устройством были произведены замеры расходов натрия через пакеты активной зоны и бокового экрана. Разница в расходах натрия через пакеты в одной и той же зоне дросселирования не превышала 5 %.

Доля натрия, поступающая на охлаждение пакетов экрана, СУЗ и корпуса реактора, первоначально была больше нормальной и частично была уменьшена специальными регулирующими элементами; 38 термомпар над пакетами активной зоны и экрана позволили установить температуру натрия, выходящего из пакетов, однако значительная часть термомпар дает заниженную температуру, по-видимому, из-за поперечных потоков холодного натрия над головками пакетов.

Еще при первых пусках циркуляции натрия по ниткам первого контура была обнаружена вибрация обратных клапанов при одновременном запуске и остановке насосов. Изучение вибрации контура показало, что частота вибраций связана с числом оборотов насоса, амплитуда вибраций невелика, но имеются резонансные частоты. По результатам измерений были выбраны рабочие диапазоны оборотов насосов с минимальной вибрацией. Основное технологическое оборудование реактора (насосы, теплообменники, ловушки окислов и др.) работало хорошо.

В конце 1970 г. был осуществлен пуск прямоточного парогенератора змеевиковой конструкции с одностеночным разделением натрия и воды. Пар с давлением 85 атм и температурой 430 °С от парогенератора был подан на турбину, а турбина подключена к энергосистеме. В настоящее время реактор БОР работает на мощности 40 МВт со средней температурой натрия на выходе из аппарата 500 °С.

Реактор БН-350

В г. Шевченко на полуострове Мангышлак завершаются монтажные работы и ведется подготовка к пуску атомной электростанции с реактором БН-350. На начало 1971 г. состояние с сооружением установки следующее. Смонтированы корпус реактора, корпуса насосов, теплообменников, парогенераторов. Изготовлены и поставлены на площадку наиболее сложные и крупногабаритные элементы: вращающиеся пробки, напорный коллектор, элементы системы загрузки-выгрузки горючего и др.

В обоснование проекта был проведен комплекс экспериментальных и расчетных исследований. Часть работ была завершена в последнее время. Ниже приведены результаты экспериментальных исследований по отдельным узлам и комплексам механизмов, дополняющие ранее опубликованные [7–9].

Для создания работоспособных узлов перегрузочных устройств были проведены испытания различных материалов с целью определения их механических свойств в рабочих условиях. Особое внимание было уделено подбору и испытанию материалов для узлов трения и мест контакта. Изучались вопросы поведения материалов в широком диапазоне контактных нагрузок и длительной выдержки. Исследовались различные сочетания материалов, в частности, стали типа 1X18H9T, X18H9 с покрытием контактных поверхностей и без него при работе в среде натрия до 550 °С. С учетом результатов испытаний были внесены изменения в конструкцию некоторых узлов механизмов, работающих в зоне высокой температуры, или изменены условия работы.

«Горячие» испытания механизмов перегрузки и элеватора проводились на натриевых стендах с циркуляцией натрия. Основные параметры стендов: температура натрия 500 °С (при стоянке механизмов) и 300 °С (при работе); содержание кислорода в натрии – до $50 \cdot 10^{-3}$ вес.%, объем жидкого металла – 1 м³ в каждом стенде. «Горячие» испытания предусматривали проведение ряда исследований при искусственно созданных «аварийных» ситуациях, таких как отказ системы управления, полное обесточивание механизмов, повышение содержания кислорода в натрии и др. Механизм перегрузки за время испытаний выполнил свыше 5000 операций извлечения и установки макета топливной сборки, а элеватор совершил около 3000 двойных ходов. Испытания головных образцов механизмов перегрузки и элеватора показали работоспособность и достаточный ресурс механизмов в нормальных условиях эксплуатации, а также их надежность в аварийных ситуациях.

Для проверки совместной работы системы перегрузки топливных сборок, проверки и отладки системы наведения механизма перегрузки на головки пакетов, системы управления перегрузочными механизмами, проверки блокировок был сооружен стенд контрольной сборки. Стенд включал в себя: металлоконструкции, имитирующие корпус и передаточный бокс реактора, вращающиеся пробки, центральную колонну с трубами СУЗ, элеваторы, механизмы перегрузки и передачи пакетов; пакеты-имитаторы; имитатор напорного коллектора; системы электрооборудования и наведения. Испытания комплекса механизмов перегрузки заключались в проведении ряда перегрузок пакетов-имитаторов при помощи штатных механизмов и управляющих систем. Наряду с проверкой работы системы в нормальном режиме, проверялась работа в ситуациях, имитирующих возможные аварийные. К последним относятся:

1. Установка и извлечение искривленного пакета-имитатора со стрелой прогиба до 10 мм с разворотом пакета на 60°, 120°, 180°.
2. Перестановка пакета при смещении оси механизма перегрузки относительно оси головки пакета на 10 мм.
3. Проверка возможности расцепления и отвода механизма перегрузки от «застрявшего» пакета, поднятого на высоту 500 мм над активной зоной.

Результаты экспериментов показали работоспособность механизмов в указанных условиях.

Чтобы гарантировать качественную сборку корпуса на монтажной площадке, на заводе-изготовителе была проведена полная контрольная сборка корпуса на специальном стенде. Весь корпус собирался на специальных приспособлениях и прихватках в кольцевых швах. Сборка подтвердила точность изготовления блоков и правильность геометрической формы корпуса. Блоки корпуса были доставлены на монтажную площадку, и в августе—октябре 1968 г. была осуществлена окончательная сборка корпуса. После сборки, сварки и тщательного контроля корпус был подвергнут гидравлическим и вакуумным испытаниям. На корпусе имеется необходимое количество тензодатчиков для исследования напряженного состояния корпуса на этапе наладочных испытаний.

Для проверки правильности изготовления нейтронной подпорки и напорного коллектора, а также их собираемости с активной зоной, на заводе-изготовителе была осуществлена контрольная сборка указанных элементов и проведены необходимые испытания. Сборка осуществлена с использованием штатных напорного коллектора, деталей нейтронной подпорки, направляющих труб управляющих

стержней. Вместо пакетов активной зоны были использованы пакеты-имитаторы, внешние габариты которых (масса, конструкция хвостовика и головки) полностью соответствовали рабочим пакетам. При контрольной сборке пакеты-имитаторы устанавливались в гнезде напорного коллектора под собственным весом.

Экспериментальные исследования по физике реактора БН-350 выполнялись, в основном, на стенде БФС. Для этой цели были использованы несколько критических сборок, отличающихся различным положением органов регулирования. Часть сборок имела однородную активную зону без пакетов органов регулирования. Основные экспериментальные данные по этим сборкам приведены в работах [12–14]. Более тщательный анализ проведенных экспериментов, а также ревизия констант основных нуклидов (урана-235 и урана-238) привели к тому, что критические параметры реактора были скорректированы по сравнению с публиковавшимися ранее данными. В результате был определен новый критразмер БН-350. Использование новых ядерных данных привело к лучшему согласию расчетов с экспериментальными результатами измерений эффективности борных стержней, чем это было ранее при использовании системы 26-групповых констант 1964 г. Распределение поля тепловыделения по активной зоне реактора на основании проведенных экспериментов рассчитывается достаточно точно.

Экспериментальные исследования доплер-эффекта выполнены на реакторе БР-1 методом активации нагретых и холодных фольг в призме из окиси урана. Эксперименты показали достаточную точность учета температурной зависимости сечений захвата уран-238 при расчете доплер-эффекта. Однако доплеровский эффект реактивности в реакторе с учетом всех неопределенностей вряд ли может быть рассчитан с погрешностью лучше 20–30 %. Изменения центральных коэффициентов реактивности, спектральных индексов и времени жизни мгновенных нейтронов в различных модификациях сборок БН-350 показывают недостаточную точность расчетного предсказания деталей спектра нейтронов и ценность их и убеждают в необходимости совершенствования как констант, так и методов расчета.

Реактор БН-600

Закончены конструкторские и проектные работы по установке БН-600. В настоящее время идет строительство зданий и сооружений и начато изготовление оборудования на заводах. В соответствии с принятой программой проводятся экспериментальные исследования по обоснованию и подтверждению характеристик установки.

Реактор БН-600 является следующей за реактором БН-350 ступенью на пути создания мощных и экономически эффективных АЭС с реакторами на быстрых нейтронах. Технико-экономический анализ показывает, что для создания АЭС с реакторами на быстрых нейтронах с высокими экономическими показателями необходимо форсирование параметров пара по сравнению с параметрами, обеспечиваемыми в БН-350. Из этих же соображений целесообразным является необходимость увеличения мощности единичного блока и повышения выгорания топлива. Из требований работы станции в энергосистеме вытекает желательность увеличения времени между перегрузками. Эти факторы и были положены в основу при разработке БН-600.

Температурные, гидравлические характеристики жидкометаллических контуров, а также термодинамические параметры пароводяного цикла реактора БН-600 выбраны с учетом следующих соображений. Сверхкритические параметры выдвигают серьезные трудности по отработке парогенераторов и, кроме того, увеличивают капитальные затраты в высокотемпературную пароэнергетическую часть. Поэтому более приемлемыми оказались параметры, которые обеспечивают КПД паротурбинного цикла на уровне 42–43 %, при температуре оболочки твэлов в пределах 680–700 °С. Анализ показал, что такими компромиссными параметрами являются:

- температура натрия на выходе из реактора 550 °С;
- средний подогрев натрия в реакторе 170 °С;
- параметры пара перед турбиной 500 °С, 130 ата

Следует отметить, что применение хорошо отработанной серийной турбины К-200-130 обеспечивает КПД турбоустановки при указанных параметрах пара на уровне 43 %.

Накопленные к настоящему времени данные позволяют рассчитывать активную зону с указанными выше температурами с тепловыделяющими элементами из смеси двуокиси урана и двуокиси плутония в оболочке из нержавеющей стали на выгорание 10 % тяжелых атомов. Однако вопрос распухания стали при таком выгорании еще недостаточно изучен. В реакторе БН-600 используются герметичные тепловыделяющие элементы. Для снижения давления газа в нижней части элемента предусмотрена газовая полость длиной 0,7 м (при длине активной части 0,75 м). Выбор размеров активной зоны, ее формы и состава производится с учетом большого количества факторов. Проработки показали, что практически очень трудно повысить объемную долю топлива выше 45–47 %, и в этом отношении состав активной зоны реактора БН-600 мало чем отличается от состава БН-350. Активная зона реактора БН-600 довольно сильно уплощена

($D/H=2,7$). Такая конфигурация активной зоны позволила увеличить расход теплоносителя через реактор при умеренном гидравлическом сопротивлении и снизить подогрев, уменьшив тем самым разницу между максимальной температурой оболочки и температурой на выходе из реактора.

Для энергетического реактора важной проблемой является обеспечение длительной работы между перегрузками топлива. Желательно перегрузку горючего совмещать с плановыми остановками АЭС. За счет применения эффективной системы компенсации реактивности реактор БН-600 имеет интервал между перегрузками, равный 4–5 месяцам при работе на полной мощности. Использование большого количества поглощающих стержней потребовало поиска оптимального их расположения, поскольку поле тепловыделения очень чувствительно к несимметрии расположения стержней. В реакторе БН-600 применена рассредоточенная система стержней, что позволило свести к минимуму колебания тепловыделения между крайними положениями компенсаторов и, кроме того, позволяет использовать естественный бор и тантал в качестве материалов компенсаторов.

Реактор БН-600, как известно, спроектирован в баковом исполнении. На выбор баковой конструкции решающее влияние оказали следующие два обстоятельства:

1. Компактное расположение оборудования первого контура и всего радиоактивного теплоносителя в одном баке, исключение боксов и упрощение вопросов герметизации первого контура.
2. Необходимость получения опыта работы реакторов с двумя концепциями: петлевой (БН-350) и баковой (БН-600) для обоснованного выбора наиболее оптимальной конструктивной схемы реакторов большой мощности.

В ходе проектирования реактора БН-600 были проработаны различные варианты компоновки первого контура: полностью баковый; активная зона и теплообменники в баке, а насос вне бака на специальных патрубках; насосы и теплообменники в отдельном корпусе и др. Подробное описание конструкции реактора дано в работе [10]. Особенность баковой компоновки оборудования требует рассмотрения ряда специальных вопросов:

1. Передача весовых нагрузок и крепление бака реактора, активной зоны, теплообменников, насосов, вращающихся пробок и других внутриреакторных элементов.
2. Вибрация оборудования и элементов конструкции.
3. Компенсация термических расширений компонентов, расположенных внутри бака и связанных между собой.

4. Обеспечение режимов работы бака реактора, которые исключили бы тепловые удары и неравномерное распределение температуры по периметру и высоте.
5. Вопросы гидродинамики в баке: равномерное распределение потоков теплоносителя через теплообменники; исключение захвата и перекачки газа по контуру и др.

Анализировались следующие схемы передачи весовых нагрузок и крепления компонентов:

а) Установка всех внутриреакторных устройств: активной зоны с защитой, насосов, теплообменников, вращающейся пробки на нижней несущей раме. Нагрузка от рамы через специальные опоры передается на фундамент. Нижняя рама с установленным на ней оборудованием и верхняя часть реактора омываются теплоносителем с различной температурой. Поэтому в такой конструкции согласование термических расширений насосов, теплообменников, пробок с верхней частью реактора и герметизация их выходов из бака является одной из трудных проблем. В реакторе БН-600 эти вопросы были решены благодаря использованию сильфонов на горловинах насосов и теплообменников. Охлаждение бака и, главным образом, его верхней части уменьшает разницу в поперечных перемещениях верхней крышки реактора и опорного пояса, на котором установлены теплообменники и насосы, тем самым улучшаются условия работы сильфонов. Сильфоны расположены в газовой полости, предусмотрена возможность их замены. Вращающиеся пробки вместе с центральной колонной и механизмом перегрузки расположена на верхней конической крышке бака. Термическое расширение происходит вверх от катковых опор, на которых установлен реактор. Нагрузка от катков передается на фундамент.

б) «Подвешенный» вариант конструкции. К мощной несущей плите подвешивался бак реактора и специальная рама, на которой устанавливалась активная зона. Тепломеханическое оборудование размещалось на верхней плите. Такой вариант конструкции требовал применения сильфоновых компенсаторов диаметром 2,0–2,5 м, работающих в теплоносителе (в случае неподвижной установки оборудования на плите) или использования подвижных опор в сочетании с сильфонами. Верхняя плита получилась сильно нагруженной, имела сложную конструкцию. Предпочтение было отдано первому варианту.

В конструкции реактора БН-600 использованы ряд конструктивных решений, примененных и экспериментально обоснованных при создании установки БН-350; поворотные пробки и их уплотнения с применением сплава олово-висмут, механизм перегрузки, элеватор, основные элементы механизма передачи пакетов и др. Сохранены

внешние габариты топливных сборок, что позволяет использовать имеющуюся технологию изготовления труб, унифицировать узлы транспортно-технологической части установки БН-350. Все это значительно сократило объем опытно-экспериментальных работ. Намеченная программа экспериментальных работ предусматривает испытания натуральных насосов первого и второго контуров, испытания моделей теплообменника, гидравлические испытания реактора на модели 1:6,6 испытание модуля парогенератора и др. Некоторые из запланированных экспериментальных работ уже выполнены.

Были проведены испытания на прочность моделей наиболее нагруженных узлов корпуса: крыши и опорного пояса. Модели были выполнены из листовой стали в масштабе 1:10 к натуре, конструкция их моделировала жесткость натуре. В результате испытаний было показано, что крыша корпуса и опорный корпус удовлетворяют условиям прочности при максимальных действующих нагрузках (в том числе, при статических нагрузках, в два раза превышающих номинальные). В процессе проектирования прорабатывались различные типы и конструкции парогенераторов. Для реактора БН-600 был выбран прямоточный парогенератор модульного типа. В качестве конструктивных материалов используются: в испарителе – низколегированная сталь перлитного класса типа 1Х2М; в пароперегревателях – аустенитная сталь типа 18/8.

Для экспериментального изучения физических характеристик реактора БН-600 и более мощных энергетических быстрых реакторов в Физико-энергетическом институте создан стенд БФС-2. Размеры этого стенда позволяют осуществить полногабаритное моделирование больших реакторов. В настоящее время на стенде БФС-2 проводится изучение модели БН-600. Основной целью исследований является получение экспериментальных данных по критическим характеристикам, эффективности системы компенсации выгорания и аварийной защиты распределению тепловыделения в присутствии системы стержней компенсации. В 1970 г. на стенде БФС-2 выполнены эксперименты по исследованию прохождения нейтронов через макет внутрикорпусной защиты реактора.

Стенд БФС-2 оборудован системой воздушного охлаждения и позволяет вести эксперименты с плутониевой загрузкой.

Список литературы

1. *Лейпунский А.И. и др.* Опыт восьмилетней эксплуатации реактора БР-5. (Доклад на III Женевской конференции).
2. *Лейпунский А.И. и др.* Быстрые реакторы БН-350 и БОР. (Доклад на конференции по быстрым реакторам в Лондоне, 1966).
3. *Лейпунский А.И. и др.* Опыт сооружения и пуска реактора БОР-60. (Доклад на конференции СЭВ в Ульяновске, 1970).
4. *Казачковский О.Д. и др.* Исследование физических характеристик реактора БОР-60. (Доклад на конференции СЭВ в Ульяновске, 1970).
5. *Лейпунский А.И. и др.* Физическая записка к опытному реактору на быстрых нейтронах БОР. Препринт ФЭИ-187, 1969.
6. *Блыскавка А.А. и др.* Изучение физических характеристик критической сборки-модели реактора БОР. Препринт ФЭИ-201, 1970.
7. *Лейпунский А.И. и др.* Сооружение атомной электростанции с реактором БН-350 // Атомная энергия, **23**, 1967, с. 409.
8. *Лейпунский А.И. и др.* Работы по реакторам на быстрых нейтронах // Атомная энергия, **23**, 1967, с.396.
9. *Лейпунский А.И. и др.* Атомная электростанция БН-350. Доклад на симпозиуме СЭВ. Обнинск, 1967.
10. *Лейпунский А.И. и др.* Атомная электростанция БН-600. Доклад на МИРЭК-УП, Москва, август 1968.
11. *Лейпунский А.И. и др.* Реактор на быстрых нейтронах БН-600. (Доклад на НУКЛЕКС-69 в г.Базеле).
12. *Лейпунский А.И. и др.* Экспериментальные и технические исследования по физике быстрых реакторов. (Доклад на конференции по быстрым реакторам, Лондон, 17–19 мая 1966 г.)
13. *Лейпунский А.И. и др.* Обзор работ по физике быстрых реакторов, выполненных на реакторах БР-1, ИБР и БФС. (Симпозиум СЭВ по быстрым реакторам). Сб.трудов, 1968, т. 2, с.177.
14. *Бондаренко В.В. и др.* Исследование полей тепловыделения в быстрых реакторах с поглощающими стрежнями.

Состояние и перспективы разработки в СССР радиационно-стойких конструкционных материалов для активной зоны быстрых реакторов¹

Одно из главных направлений, позволяющих существенно улучшить экономические показатели быстрых реакторов, — значительное повышение выгорания топлива. Насколько это эффективно, можно судить хотя бы по тому, что увеличение выгорания на 1 % в БН-600 даст экономический эффект несколько миллионов рублей в год. Но такое повышение выгорания топлива сдерживают конструкционные материалы активной зоны реактора. Под воздействием быстрых нейтронов, имеющих энергию больше энергии межатомных связей, атомы многократно смещаются со своих мест, что губительно отражается на основных свойствах конструкционных материалов и особенно на важнейшем из них — пластичности. Внешние проявления этого воздействия — радиационный рост и распухание металлов. Значительное распухание и потеря механических свойств стали наблюдаются уже при небольшой повреждающей дозе — около 50 с.н.а., что соответствует выгоранию 6–7 %. С учетом характера зависимости радиационного распухания от повреждающей дозы в последующий период оно возрастает с увеличивающимся темпом. Это еще в большей степени осложняет разработку радиационно стойкой стали, выдерживающей высокое выгорание топлива.

К концу 70-х годов на основании анализа данных экспериментальных и теоретических исследований как советских, так и зарубежных ученых стало возможным с известной определенностью оценить возможное влияние некоторых факторов — типа стали, содержания легирующих и примесных элементов, режима термомеханической обработки — на радиационное поведение. И было очевидно, что без целенаправленных и систематических исследований эту задачу не решить. Так в нашей стране была создана первая комплексная программа по разработке радиационно стойких материалов для активной зоны

¹ Атомная энергия, т. 70, вып. 2, 1991, с. 104–107. Авторы: Решетников Ф.Г. (ВНИИНМ им. акад. А.А. Бочвара), Митенков Ф.М. (ОКБМ), Троянов М.Ф. (ФЭИ)

быстрых реакторов, которая во многом аналогична национальным программам других стран. Программа была рассчитана на разработку материалов, обеспечивающих выгорание не менее 10 %, и предусматривала как разработку новых марок сталей и сплавов, так и исследование некоторых уже имеющихся. В рамках программы испытано пять марок стали аустенитного класса, из которой изделия готовились как в аустенизированном, так и холоднодеформированном состоянии: 08X16H11M3T, 06X16H15M3Б (ЭИ-847), 10X17H13M2T (ЭИ-448), 08X16H15M3БР (ЭП-172), 06X16H14M2Г2ТФР (ЧС-68), три марки стали ферритно-мартенситного класса X13M2БФР (ЭП-450), 05X12H2M, X12MBCФБР (823), три высоконикелевых сплава 03X21H32M3Б, 07X15H35M3, 05X16H40MTЮР.

В качестве базовой для разработки новой стали аустенитного класса для оболочек твэлов была взята ранее разработанная и хорошо изученная сталь 0X16H15M3Б (ЭИ-847). Она была модифицирована бором (0,005–0,008 %) и получила известность как сталь 0X16H15M3БР (условное наименование ЭП-172). К этому времени уже были данные о том, что бор – одна из эффективных легирующих добавок, существенно замедляющая радиационное распухание и ползучесть стали. Реакторные испытания подтвердили расчеты. Для этой стали характерно еще одно важное свойство – она в значительно меньшей степени взаимодействует с топливным сердечником твэла и продуктами деления, то есть меньше корродирует и охрупчивается и, следовательно, сохраняет работоспособность до более высокого выгорания. На той же основе была разработана сталь 06X16H15M2Г2ТФР (ЧС-68), легированная помимо бора кремнием и титаном – элементами, особенно положительно воздействующими на радиационное поведение. В существенном влиянии кремния на радиационные свойства стали можно убедиться, рассматривая облученные штатные ТВС с оболочками твэлов из стали 06X16H15M3Б. Твэлы имели различное удлинение. Как показали исследования, их оболочки отличались только содержанием кремния, хотя оно во всех случаях удовлетворяло требованиям технических условий. Это позволило оптимизировать содержание кремния в разрабатываемой стали.

Обе марки стали прошли представительные реакторные и послереакторные исследования. Твэлы с оболочками из этой стали в холоднодеформированном состоянии выдерживают выгорание топлива не менее 10 %, а в экспериментальных ТВС было достигнуто существенно более высокое выгорание топлива. Распухание при повреждающей дозе 70 с.н.а. составляет 5,2–5,4 %, в то время как базовой стали – около 12 %. Во всех случаях максимальное распухание наблюдалось в интервале температуры 420–450 °С.

Максимальная проектная температура оболочек – 710 °С. Твэльные трубы из обеих марок стали, принятых взамен стали 0X16H15M3B, используются в холодnodeформированном состоянии со степенью деформации около 20 %.

Для шестигранных чехлов исследовали три марки стали ферритно-мартенситного и одну сталь аустенитного класса. Наиболее полно изучили сталь X13M2БФР, с использованием которой в экспериментальных ТВС было достигнуто выгорание около 20 %. При испытаниях экспериментальных ТВС реактора БН-600 при выгорании топлива 11,8 % (87,5 с.н.а.) распухание стали составило менее 1 %, среднее увеличение размера шестигранника – около 0,6 мм. Эта сталь и была рекомендована для шестигранников. Две другие марки стали этого же класса продолжают исследовать, так как по отдельным свойствам они имеют некоторые преимущества перед сталью X13M2БФР. Так, сталь 05X12H2M лучше сваривается, а X12MBCФБР, по предварительным данным, проявляет меньшую склонность к низкотемпературному радиационному охрупчиванию.

Исследования высоконикелевых сплавов не получили большого развития из-за склонности к высокотемпературному охрупчиванию.

По результатам исследований в 1987 г. было принято решение о замене ранее использовавшейся стали в БН-600 и БН-350, благодаря чему удалось увеличить длительность интервала между перегрузками со 100 до 165–185 эф.сут, причем за 2,5 года не разгерметизировался ни один твэл. Это неплохой показатель, если учесть, что температура оболочки может достигать 700–710 °С, линейная мощность твэлов – до 490 Вт/см.

Разработанные марки стали приняты также для ТВС БН-800. Дальнейшее значительное повышение выгорания топлива при плотной упаковке пучка твэлов ограничено, поскольку чрезвычайно трудно выполнить одно из важнейших требований для нормальной работы активной зоны реактора – обеспечить деформационную совместимость чехла и пучка твэлов. Этому препятствует то, что материалы оболочки при повреждающей дозе 70–90 с.н.а. распухают существенно больше (в 10 раз и более), чем материалы чехла. Напрашивающееся решение – изготовить оболочки, как и чехлы, из одной из рассмотренных сталей ферритно-мартенситного класса – для данной конструкции твэлов нереализуемо, поскольку не удовлетворяются требования длительной прочности при температуре оболочки 700–710 °С. Сталь этих марок также недостаточно коррозионно-стойкая в воде, что осложняет длительное хранение отработавших ТВС в бассейнах с водой до переработки. Этот вопрос изучается, и есть основания полагать, что условия

для длительного хранения отработавших ТВС с такими оболочками будут найдены.

В 1988 г. была утверждена вторая комплексная программа по разработке радиационно-стойкой стали, обеспечивающей выгорание топлива до 15 %. Предложен комплексный подход к решению проблемы, поэтому программа по сравнению с первой охватывает более широкие вопросы, что объясняется большой трудностью решения поставленной задачи. В частности, помимо тех направлений легирования, которые были использованы при разработке упоминавшейся аустенитной стали, предусмотрено исследование аустенитной стали типа 16 % Cr – 20 % Ni – 3 % Mo, имеющей низкое содержание углерода ($\leq 0,03$ %) и высокое титана (около 1 %). В отличие от первых двух марок стали основной эффект подавления распухания достигается за счет предвыделений и выделений дисперсных частиц γ -фазы (Ni_3Ti) в процессе облучения, а не выделения дисперсных карбидов $\text{MC}(\text{Ti}, \text{Mo})\text{C}$ или NbC . Реакторные испытания показали, что сталь с 1 % титана при повреждающей дозе 60–70 с.н.а. распухает незначительно – около 1,5 %.

Помимо разработки новой стали предусматривается усовершенствование используемой на базе улучшенной основы, имея в виду использование лучших исходных шихтовых материалов, оптимизацию содержания легирующих и примесных элементов. Большое внимание уделяется металлургическим процессам, в которых формируются основные свойства материала, и отработке режимов термомеханической обработки полуфабрикатов и готовых изделий.

Как уже отмечалось, при значительном повышении выгорания топлива и, следовательно, увеличении повреждающей дозы особенно остро дают о себе знать проблемы деформационной совместимости чехла и пучка твэлов. Одним из заманчивых и, может быть, кардинальных путей решения является все же применение ферритно-мартенситной стали и для чехла, и для оболочек твэлов, хотя и найдена основная причина, затрудняющая использование стали этого класса для оболочек твэлов. Здесь предусматривается изучение нескольких направлений. Во-первых, исследуется возможность понижения температуры оболочки твэлов, чтобы можно было использовать эту сталь. Во-вторых, подготавливаются испытания твэлов в БН-600 с утолщенными оболочками 0,5–0,55 мм вместо 0,4 мм с сохранением внешнего диаметра оболочки, за счет чего представляется возможным уменьшить скорость термической ползучести оболочек при температуре эксплуатации. И, в-третьих, разрабатывается высокопрочная дисперсно-упрочненная хромистая сталь. В качестве дисперсно-упрочняющих добавок предусматриваются

высокодисперсные порошки оксидов титана и иттрия. В основу разработки такой стали заложено несколько основополагающих требований: предельно возможная дисперсность оксидов, равномерное их распределение в стали, минимальная скорость коагуляции и сохранение равномерности распределения оксидов на всех последующих операциях термомеханической обработки. Для введения оксидов в матрицу ферритно-мартенситной стали были применены методы внутреннего окисления и механического смешения. Отработанная технология обеспечивает получение стали с включением оксидов крупностью около 0,05 мкм. Это, по нашим представлениям, хорошая дисперсность, если достигается приемлемая равномерность распределения оксидов.

Рекомендуемое содержание оксидов в стали составляет 2–4 % по объему. Разработанные режимы отжига, измельчения, смешивания, компактирования и гидроэкструзии сохраняют дисперсность упрочняющей фазы. На данном этапе исследований явно выраженного предпочтения одному из двух оксидов не отдано. Полученная сталь характеризуется удовлетворительными технологическими свойствами, обработкой давлением и сваркой. Твэлы герметизируют обычной аргонодуговой сваркой, но предпочтительнее контактно-стыковая, не вносящая изменений в структуру металла пришовной зоны.

Оптимизация диаметра твэлов в целях достижения более высоко-го выгорания затрагивает твэлы с оболочками не только из ферритно-мартенситной, но и аустенитной стали. Изучаются варианты ТВС с тем же шестигранником 96x2 мм, но диаметром твэлов 6,6–6,8 вместо 6,9 мм. Это позволит сохранить необходимый теплосъем и охлаждение твэлов при их значительно большем распухании.

На работоспособность оболочки твэлов существенно влияют внутритвэльные химические процессы взаимодействия продуктов деления и топлива с оболочкой. Отрицательное воздействие этих процессов особенно возрастает с повышением выгорания и увеличением длительности кампании. Наиболее вредное воздействие на оболочку оказывают цезий, иод, теллур вследствие коррозионных процессов, ухудшающих работоспособность оболочек. При этом в аустенитной стали наблюдается преимущественно межкристаллитная коррозия, в ферритно-мартенситной стали – фронтальная или общая коррозия. Конечно, учитывается и то обстоятельство, что уже при выгорании топлива 6–7 % наблюдается полный выход газовых продуктов деления (криптон, ксенон).

Для высоконапряженных быстрых реакторов важно обеспечить необходимую исходную внутритвэльную среду. По действующим

техническим условиям, исходное содержание гелия в твэлах БН-600 должно быть не менее 95 %.

На базе проводимых исследований разрабатывается технический проект твэлов с урановым оксидным топливом для БН-600, рассчитанный на выгорание 12,5 % и повреждающую дозу более 90 с.н.а.

При использовании уран-плутониевого оксидного топлива большое влияние на характер взаимодействия топлива с оболочкой оказывает кислородный коэффициент топлива. Его значение необходимо поддерживать в пределах 1,96–1,99. Для смешанного топлива значительно в большей степени, чем для уранового, важна максимальная температура в центре сердечника и, как следствие, температурный градиент в топливе. С их увеличением происходят существенное перераспределение плутония по сечению твэла, а также серьезные структурные изменения большей части сердечника твэла. Оба эти фактора не способствуют повышению работоспособности твэлов.

Все указанные обстоятельства побуждают вести работы по конструкционным материалам активной зоны быстрых реакторов в едином комплексе с оптимизацией конструкции и технологии твэлов, ТВС и активной зоны в целом.

Быстрые реакторы: опыт разработки, создания и эксплуатации, перспективы развития¹

Опыт эксплуатации быстрых реакторов

Разработка быстрых реакторов в нашей стране началась 40 лет назад по инициативе и под руководством А.И.Лейпунского. Отечественный опыт эксплуатации быстрых реакторов (БР-10, БОР-60, БН-350, БН-600) насчитывает более 90, а в мире – более 200 реакторо-лет.

Эти реакторы подтвердили свою высокую безопасность при эксплуатации. Отрицательные температурный и мощностной коэффициенты реактивности обеспечивают саморегулируемость реакторов. Поле тепловыделения в активной зоне стабильно, избыточная реактивность невелика. Управление реактором простое. Отвод теплоты натрием эффективен, запас до кипения в активной зоне при работе составляет не менее 300 °С. Низкое давление натрия и отсутствие заметных коррозионных явлений в нем обеспечивают полную герметичность контуров. Протечки радиоактивного натрия локализуются разработанными средствами. Достигнут высокий уровень надежности. Устойчиво работало основное натриевое оборудование. Межремонтная наработка основных циркуляционных насосов превысила 70 тыс. ч, парогенераторов – 100 тыс. ч, элементы конструкции реактора и натриевых контуров работают без существенных замечаний с начала пуска реакторов.

Коэффициент использования установленной мощности БН-600 по сравнению с КИУМ других реакторов таков, %:

	1988 г.	1989 г.	1990 г.	1991 г.	1992 г.
БН-600	77	76	66	70	84
ВВЭР-440	79,4	79,7	79,6	69,3	73,2
ВВЭР-1000	65,5	59,1	58,7	63,7	67,7
РБМК-1000	65,7	77,4	68,9	69,3	64,7

¹ Журнал «Атомная энергия», т. 76, вып. 4, 1994, с. 339–345. Авторы: Ермаков Н.И. (Минатом РФ), Муругов В.М., Троянов М.Ф., Багдасаров Ю.Е., Кочетков Л.А., Матвеев В.И., Поплавский В.М. (ФЭИ), Митенков Ф.М., Кирюшин А.И., Кузавков Н.Г., Синельник С.И., Рогов В.А. (ОКБМ).

Снижение коэффициента использования установленной мощности БН-600 в основном связано с перегрузочными работами, в 1993 г. он составил 80 %. Радиационное воздействие быстрых реакторов на окружающую среду минимально. Усредненный за период эксплуатации выход активности в атмосферу из реактора БН-600 составил менее 10 Ки/сут при допустимом по современным нормам 500 Ки/сут.

Большой опыт эксплуатации быстрых реакторов накоплен также во Франции, Великобритании, США.

Безопасность быстрых реакторов в связи с требованиями к блокам следующего поколения

Быстрые реакторы обладают необходимыми предпосылками для реализации требований, которые сформулированы для блоков АЭС следующего поколения. Этому способствуют свойственные им уникальные качества и принятые технические решения:

- устойчивая отрицательная обратная связь при возмущениях по мощности и температуре; известный для традиционных активных зон быстрых реакторов недостаток, связанный с положительным натриевым пустотным эффектом реактивности при запроектных авариях, может быть существенно ослаблен или устранен (что и выполнено, например, в проекте БН-800);
- возможность достижения близкого к единице внутреннего коэффициента воспроизводства топлива в активной зоне;
- отсутствие эффектов типа ксенонового отравления реактора с последующим вводом положительной реактивности;
- высокая стабильность нейтронных полей;
- низкое давление теплоносителя, определяемое гидравлическим сопротивлением контура;
- высокая теплоаккумулирующая способность натриевых контуров реактора с интегральной компоновкой, обеспечивающая большую инерционность нестационарных процессов при нарушениях теплоотвода;
- высокая теплота парообразования натрия и значительные запасы до кипения;
- удержание натрия и улавливание холодными ловушками значительной доли радиоактивных продуктов деления в случае их выхода из твэлов в теплоноситель;

- низкая коррозионная активность натрия по отношению к конструкционным материалам, повышающая надежность работы герметичных защитных барьеров;
- пассивная система остановки реактора, переводящая и поддерживающая его в подкритическом состоянии, в том числе и при длительном расхолаживании;
- пассивная система аварийного расхолаживания контура, обеспечивающая отвод остаточного тепловыделения без превышения пределов безопасной эксплуатации.

Несмотря на известное отрицательное свойство натрия загораться при истечении на воздух, опыт эксплуатации подтверждает безопасность реакторов при реализации таких утечек. Экспериментальные исследования показали, что натрий воспламеняется при температуре выше 180 °С, его горящий слой выделяет примерно в 15 раз меньше теплоты, чем слой нефтепродуктов равной площади.

Разработаны, реализованы и показали высокую эффективность такие средства борьбы с указанным недостатком, как индикаторы появления разгерметизации (электрические цепи, пожароизвещатели, фильтры обнаружения радиоактивных аэрозолей и др.), пассивные средства тушения натрия (различные порошковые составы), пассивные барьеры (страховочные кожухи на корпусах и трубопроводах) и т. д. На действующих реакторах было несколько десятков случаев утечек натрия, в том числе в октябре 1993 г. при многочасовой течи из контура БН-600 (вытекло около 1 т натрия). Ни в одном случае ситуация не квалифицировалась как авария по международной шкале событий и не сопровождалась облучением персонала или населения.

БН-800, сооружаемый на Южно-Уральской АЭС, в полной мере обладает указанными качествами, в том числе за счет введения в проект пассивных средств воздействия на реактивность, системы аварийного расхолаживания через воздушные теплообменники, поддона для сбора расплавленной массы топлива. Это позволило вывести БН-800 на уровень, соответствующий требованиям по безопасности реакторов нового поколения.

Возможности улучшения экономических показателей

Основными путями для достижения этой цели являются:

- 1) повышение выгорания топлива, определяющего экономичность топливного цикла;

- 2) усовершенствование технологических процессов переработки топлива и производства ТВЭЛов;
- 3) упрощение и сокращение вспомогательных систем и систем аварийного энергоснабжения;
- 4) усовершенствование, оптимизация и укрупнение основного оборудования, минимизация числа теплоотводящих петель, протяженности натриевых трубопроводов второго контура, упрощение транспортно-технологического тракта загрузки-выгрузки ТВС;
- 5) уменьшение строительных объемов и материалоемкости энергоблока за счет реализации мероприятий 3) и 4), а также использования более прогрессивных компоновочных решений;
- 6) увеличение срока службы реакторной установки (с учетом морального старения), для чего имеются благоприятные возможности, учитывая низкую коррозионную активность натрия;
- 7) переход к серийному строительству.

В результате сравнительного анализа показано, что металлоемкость усовершенствованного блока БН-600М может быть уменьшена на 40 % по отношению к БН-600 и на 25 % – к БН-800.

Совместными усилиями западноевропейских стран был создан проект быстрого реактора *EFR* (Европейский быстрый реактор) электрической мощностью 1500 МВт, в котором благодаря множеству усовершенствований удалось существенно снизить металлоемкость конструкции. В результате удельные капитальные вложения должны снизиться по сравнению с «Суперфениксом-1» (Франция) на 45 % и затем при переходе в серию – еще на 22 %.

Оценки показывают, что для серийных быстрых реакторов удельные капитальные вложения составят 1800–2000 дол. США/кВт, для тепловых легководных – 1500 дол./кВт. Таким образом, среднее отношение этих показателей оценивается в 1,26. В нашей стране, где созданы новые типы легководных тепловых реакторов, разрыв в удельных капитальных затратах между тепловыми и быстрыми реакторами сократился.

Повышение требований безопасности способствует сближению экономических показателей быстрых и тепловых реакторов, поскольку в быстрых реакторах эти цели достигаются более простыми средствами. В таблице приведены затраты на строительство некоторых головных и серийных блоков нового поколения АЭС.

АЭС, блок	Мощность, МВт	Сметная стоимость, млн руб.	Удельная стоимость, руб./кВт
Южно-Уральская АЭС, головной блок БН-800, 2-я очередь, 2 БН-800	800 <u>1600</u> 2400	56694 <u>55770</u> 112464	70860 46860
Белоярская АЭС, 4-й блок, БН-800	800	44949	56186
Кольская АЭС, 3-я очередь, 5, 6, 7-й блоки	1890	92400	48888
Сосновый Бор, головной блок НП-500	630	36795	58404
Приморская АЭС (или АЭС в Димитровграде), головной блок НП-600	1200	70950	59125

Можно привести еще один пример расчета экономических характеристик трех альтернативных энергоблоков, предназначенных для сооружения в условиях одной и той же площадки. Речь идет о выборе энергоисточника для Калужской области. Рассматривались АЭС с тепловыми $3xВ-407$, быстрыми реакторами $3xБН-600М$ и ТЭС на угле. Поскольку расчеты выполнялись несколько лет назад, интерес представляют относительные денежные величины. Оказалось, тепловые и быстрые реакторы равноэкономичны и значительно экономичнее ТЭС на угле.

Экологические проблемы и роль быстрых реакторов в их решении

Энергоблоки любого типа оказывают радиационное и тепловое воздействие на окружающую среду. Наиболее острой проблемой, связанной с функционированием атомной энергетики, является накопление высокоактивных отходов в виде продуктов деления и малых актиноидов — нептуния, америция, кюрия. В долгосрочном плане наибольшую опасность представляют последние, для распада которых требуются тысячелетия. Это является главным препятствием в организации хранения высокоактивных отходов. В связи с этим рассматривается возможность снижения активности отходов трансмутацией, то есть облучением долгоживущих радиоактивных

нуклидов для перевода их в короткоживущие или стабильные нуклиды. В быстром реакторе эти актиноиды подвержены делению высокоэнергетическими нейтронами, то есть могут использоваться в качестве топлива. Это позволит эффективно выжигать нептуний, америций, кюрий в быстрых реакторах путем их добавления к основному топливу. Так, при введении в топливо БН-800 3,5 % примесей в виде оксидов обеспечивается их выжигание в количестве 100 кг/год (разность между количеством загружаемых и выгружаемых актиноидов). Таким образом могут «обслуживаться» три реактора ВВЭР-1000. Возможно и более интенсивное выжигание нептуния, америция, кюрия в специализированном быстром реакторе (или специализированной активной зоне).

Кроме этих актиноидов, большую потенциальную опасность для окружающей среды представляет плутоний. Его хранение увеличивает радиотоксичность, поскольку в результате распада ^{241}Pu происходит накопление долгоживущих альфа-излучателей: ^{241}Am (период полураспада – 443 года) и ^{237}Np (более 2 млн лет). Особенно остро этот вопрос стоит для так называемого высокофонового плутония. Такой плутоний нарабатывается в тепловых реакторах. К 1993 г. его накоплено свыше 25 т. Доказано, что высокофонный плутоний целесообразно сжигать в быстрых реакторах. БН-800 за один год работы способен перевести 200 кг высокофонового плутония в низкофонный, что заметно уменьшит накопление самого опасного радиоактивного вещества. Тепловые реакторы в принципе не способны переводить высокофонный плутоний в низкофонный, в любом случае в них накапливается только высокофонный.

Необходимо отметить еще одну важную особенность быстрых реакторов – возможность накопления в зонах воспроизводства достаточно чистого ^{233}U . Схемы его накопления разнообразны и могут сочетаться с выжиганием актиноидов. Нароботанный ^{233}U целесообразно использовать в тепловых реакторах, что улучшит их характеристики безопасности.

В условиях широкомасштабного строительства атомных станций большое значение приобретает вопрос снижения их теплового воздействия на окружающую среду. Быстрые реакторы имеют здесь неоспоримые достоинства, поскольку способны обеспечить КПД (брутто) 40–42 %. Это уменьшит тепловые сбросы по сравнению с тепловыми реакторами при одинаковой электрической мощности примерно на 40 %.

Создание замкнутого топливного цикла

Первые реакторы БН-350 и БН-600 были введены в строй и работают до настоящего времени в конвертерном режиме, что обусловлено отсутствием завершеного промышленного производства уран-плутониевого оксидного топлива. Такое решение позволило ускорить сооружение этих реакторов и представляется оправданным в условиях хорошо развитого в нашей стране производства по добыче и обогащению урана.

Работоспособность оксидного смешанного таблеточного топлива подтверждена облучением экспериментальных ТВС в реакторах БОР-60, БН-350, БН-600. Твэлы для этих ТВС изготавливаются на опытной установке ПО «Маяк». Проводятся также испытания ТВС с виброуплотненным смешанным топливом, опытное производство которого создано в НИИАР.

На начальном этапе быстрые реакторы будут работать на плутонии, накопленном в результате переработки уранового топлива тепловых реакторов, а также БН-350 и БН-600. Заметим, что в тепловых реакторах в нашей стране плутоний пока не используется.

Другим возможным источником поступления плутония является конверсия ядерного оружия.

Уникальные возможности для производства замкнутого цикла имеет ПО «Маяк»:

- действует завод РТ, продукцией которого являются регенерат урана и плутоний;
- строится Комплекс 300 по изготовлению ТВС из уран-плутониевого топлива (выполнены работы в объеме ~50 % общих затрат);
- действует комплекс установок по переработке радиоактивных отходов;
- имеется возможность переработки отработавшего топлива БН-800 в модернизированных технологических отделениях завода РТ.

Таким образом, в случае ввода в эксплуатацию Южно-Уральской АЭС с блоками БН-800 и Комплекса 300 будет реализован замкнутый топливный цикл, который позволит сконцентрировать в одном месте все производства по извлечению и сжиганию наиболее опасного делящегося материала плутония и избежать его перевозки по территории страны. Полученный опыт станет основой для дальнейшего широкомасштабного развития предприятий топливного цикла атомной энергетики.

Утилизация оружейного плутония

Эффективное и безопасное применение оружейного плутония является частью проблемы повторного использования топлива в атомной энергетике, реализация безопасного и экологически приемлемого замкнутого топливного цикла.

Быстрые реакторы наиболее подготовлены к использованию уран-плутониевого топлива, в том числе на основе оружейного плутония. Работающий сегодня на обогащенном урановом топливе БН-600 способен потреблять до 0,6 т плутония в год. Один блок БН-800 рассчитан на использование 2,3 т плутония для начальной загрузки и 1,6 т для ежегодной подпитки. Загрузка всего топливного цикла (включая внешний топливный цикл) составит ~10 т оружейного плутония. К настоящему времени более 2 тыс. твэлов на основе смешанного топлива прошли испытания в БН-350 и БН-600. Ни один из испытанных твэлов не потерял герметичности при выгорании до 10% т.а., теплонапряженности 490 Вт/см и температуре оболочки 690 °С.

Таким образом, действующие и строящиеся быстрые реакторы позволяют достаточно эффективно решать задачу утилизации оружейного плутония.

Международное сотрудничество

Результаты работ по быстрым реакторам, проводившихся в разных странах, уже с 1955 г. стали объектом широкого международного обмена. Совместный опыт разных стран вложен в каждую национальную программу, особенно в инженерные решения, хотя целевые установки и стратегическая роль быстрых реакторов в энергетике в течение прошедшего периода рассматривались по-разному.

В пользу расширения международной кооперации можно привести следующие соображения:

- установки нового поколения должны иметь уровень безопасности, отвечающий международным стандартам;
- во всех странах в качестве основной концепции быстрого реактора принят вариант с натриевым охлаждением. Выполнен огромный объем экспериментальных исследований как на стендах, так и в реальных условиях по изучению поведения активной зоны в тяжелых авариях, сопровождающихся кипением натрия и плавлением топлива. Разработано большое число комплексных кодов для расчета протекания аварийных процессов. Эти работы требуют больших средств, поэтому выполнялись, как правило, в рамках международной кооперации. Особенно заметно такая тенденция

стала проявляться в середине 80-х годов. Наглядным примером тому является объединение усилий ведущих европейских стран в разработке общего проекта быстрого реактора вместо независимого параллельного развития национальных программ;

- Российская Федерация обладает достаточным потенциалом для равного и достойного партнерства с зарубежными странами;
- необходима унификация с зарубежными проектами по наиболее важным конструкционным элементам;
- необходима кооперация с зарубежными партнерами в решении проблем радиохимии и обращения с радиоактивными отходами, что, несомненно, отвечает взаимовыгодным интересам.

Заключение

С позиций накопленного к 40-летию развития атомной энергетики отечественного и мирового опыта видно, что раскрываются новые стороны потенциала быстрых реакторов. То, что давно и хорошо известно – воспроизводство и неограниченное расширение сырьевой базы, дополняется возможностями достижения высокой безопасности и приемлемой экономичности, утилизации плутония – энергетического и оружейного, важными экологическими преимуществами. Концентрация усилий дальнейшей разработки на этих особенностях быстрых реакторов позволит ввести в атомную энергетику конкурентоспособный тип реактора еще до того, когда появится потребность масштабного воспроизводства.

Малая атомная энергетика. Атомное теплоснабжение

О перспективе развития малой атомной энергетике в России

Поддержание и развитие экономики России в значительной степени зависит от освоения природных богатств приполярных регионов страны. Газовые и нефтяные месторождения, залежи руд дефицитных и редких металлов выявлены именно в этих регионах. Их освоение невозможно без создания автономных энергоисточников, поскольку здесь отсутствуют, как правило, энергосети.

Не случайно Газпром, учитывая реальную ситуацию с электропроизводством, приступил к активной деятельности по созданию собственного парка электростанций малой мощности от 200 кВт до 25000 кВт, работающих на газе или нефтепродуктах. Имеются основания считать, что при определенных условиях здесь может эффективно проявить себя и атомная энергетика.

Внимание к исследованиям возможностей создания эффективной атомной энергетике малой мощности (МАЭ) в последние годы явно растет. Об этом свидетельствует и организация в МАГАТЭ постоянной консультативной группы по этой проблеме. Представляет интерес в этом плане сообщение о проекте *ESKOM* и доклад Н.В. Брауна и Д.П. Хасбергера на консультативной встрече МАГАТЭ в Обнинске.

В России разрабатывается проект плавучей атомной станции (ПАС) для г.Певек, которая обеспечит производство 60 МВт(э) электроэнергии и 51 Гкал/ч тепловой энергии. Проектом предусматривается использование в составе ПАС освоенной реакторной установки, хорошо себя зарекомендовавшей в течение многолетней эксплуатации атомных ледоколов (КЛТ-40С).

Требования к малым атомным станциям (МАС) в целом определяются конкретными особенностями их использования, и в частности особенностями нагрузки основных потребителей. Но часть требований представляется достаточно общей, а именно:

- требования, вытекающие из условий автономной работы МАС;
- одновременное производство электрической и тепловой энергии;
- гарантированная безопасность населения и окружающей среды при любых технически возможных авариях;
- высокая ресурсная надежность;
- простота проектной схемы;
- моноблочная или модульная компоновка;
- простая схема управления;
- достаточно большой энергозапас, обеспечивающий многолетнюю работу без перезарядки реактора (в пределах на весь срок службы станции);
- минимальная численность обслуживающего персонала, для чего необходимо в максимальной степени использовать телеконтроль, телеуправление, периодическое профилактическое обслуживание и ремонты по вахтовой схеме;
- низкая себестоимость, обеспечивающая конкурентоспособность с альтернативными энергоисточниками в тех же условиях эксплуатации;
- короткие сроки создания, для чего объем строительно-монтажных работ должен быть минимальным;
- относительно быстрая окупаемость.

Сформулированные выше требования сводят практически на нет инфраструктуру, необходимую непосредственно для эксплуатации станции. Однако они не могут быть удовлетворены в полном объеме при проектировании МАС на технических решениях, оправдавших себя в атомных станциях средней и большой мощности. Для достижения технико-экономических характеристик, диктуемых спецификой МАС, требуются принципиально новые инженерные подходы, другие проектные решения, которые хотя и должны базироваться на опыте, накопленном при создании и эксплуатации АЭС большой и средней мощности, но будут оригинальными, новыми, суть которых определяется именно малой мощностью атомной станции. Например, очевидно, что в МАС значительно упростятся системы безопасности и строительные решения.

Поиск новых проектных решений может быть успешным только в результате целенаправленных исследований и системных разработок. Представляется, что наиболее перспективными направлениями поиска являются:

- одноконтурная реакторная установка с гелиевым теплоносителем и газотурбинным комплексом;
- моноблочная или модульная установка с реактором типа ВВЭР с герметичным турбогенераторным комплексом.

Следует заметить, что задача финансового обеспечения сооружения МАС, удовлетворяющей перечисленным выше требованиям, возможно, может решаться с участием коммерческого капитала.

К вопросу о перспективе развития малой атомной энергетики (МАЭ)

Последовательное обсуждение проблемы развития атомной энергетики малой мощности, вообще говоря, должно проводиться в рамках общей программы развития топливно-энергетического комплекса (ТЭК). Однако такая программа предполагает наличие развернутой стратегии преодоления экономического кризиса и развития экономики страны.

К сожалению, этой программы, насколько известно широкой общественности, у руководства страны нет. Но из этого не следует, что при сложившихся условиях исследование проблемы перспективности МАЭ нецелесообразно и заведомо нерезультативно.

Дело в том, что задача представительного обоснования технических возможностей создания атомных станций, удовлетворяющих необходимым технико-экономическим требованиям с учетом предполагаемых регионов их размещения для нашей страны актуальна уже сейчас, и, несомненно, ее актуальность будет возрастать по мере выхода страны из экономического кризиса.

Хотя особенности экономической ситуации в России существенно ограничивают проведение исследовательских работ, поисков перспективных решений, но необходимо учитывать, что решение энергетических проблем является необходимым и первоочередным условием жизнеобеспечения страны, поддержания и развития ее экономики. Поэтому принципиально важно для восстановления экономики страны не допускать перерыва в исследованиях, проектных разработках, с тем чтобы избежать ситуации, связанной с отсутствием задела, когда необходимость в малой энергетике может стать критической при решении каких-то важных для страны задач.

Поэтому имеет смысл сформулировать основные исходные положения и некоторые технические требования, которыми целесообразно руководствоваться при поисковых проектных разработках энергоблоков применительно к атомным станциям малой мощности.

Ниже в порядке обсуждения сформулированы соответствующие предложения.

Исходные положения и требования для разработки концептуальных проектов ЯЭУ для АЭС малой мощности

I. Назначение. Малая атомная энергетика ориентируется на использование в тех регионах страны, которые имеют потребность в электроэнергии и тепловой энергии относительно малой мощности, но удалены от крупных энергоисточников и не имеют связи с ними через энергетические сети.

II. Общие положения. Относительно малая мощность энергоисточников МАЭ и предполагаемые регионы их использования в значительной степени определяют специфику, особенности атомных станций (АС), создаваемых для этих регионов.

Полная автономность малой АС диктует необходимость предельно устойчивой ее работы, что достигается в первую очередь за счет максимально упрощенной схемы энергоблока станции, повышения ресурсной надежности всего оборудования и систем.

Сложные условия бытового обеспечения строителей и монтажников в регионах предполагаемого размещения малых АС исключают традиционную организацию строительно-монтажных работ при сооружении АС. Необходимы новые организационно-технические решения, сводящие к минимуму объем строительных и монтажных работ на строительной площадке.

Критичность кадрового обеспечения, дороговизна специального технического оснащения и сооружения помещений, отвечающих нормативным требованиям, обуславливают необходимость сведения к минимуму (а лучше – полного исключения) эксплуатационных операций с радиоактивными продуктами и материалами.

III. Технические требования. Назначение и специфические условия регионов размещения АС малой мощности позволяют сформулировать тот минимум технических требований, которым необходимо следовать при разработке концептуального проекта АС.

При этом необходимо иметь в виду, что имеющийся к настоящему времени опыт создания АС не подтверждает возможности достаточно полного и обоснованного учета всех особенностей регионов размещения АС малой мощности при использовании только уже отработанных и проверенных в эксплуатации технических решений. Поэтому приведенный ниже перечень технических требований к АС ориентирован не только на полное использование накопленного опыта, но и на творческий поиск новых нетрадиционных решений.

1. Мощность АЭС должна определяться потребностью в электрической и тепловой энергии предполагаемого региона размещения АС с учетом прогнозируемого его развития. (Проектом плавучей АС с привязкой г.Певек, Чукотка, предусматривается производство для потребителей 60 МВт электрической и 50 Гкал/ч тепловой энергии.)

2. Гарантированная безопасность обеспечивается за счет:

- отрицательных обратных связей в реакторе (температурный и мощностной коэффициенты реактивности);
- самосрабатывающих защитных устройств;
- пассивных средств аварийного теплоотвода и расхолаживания.

3. Вероятности разгерметизации первого и второго контуров должны быть минимальной (менее 10^{-6}).

4. Структура и состав оборудования АС должны включать минимально возможное число конструкций, содержащих вращающиеся, подвижные и перемещающиеся элементы в процессе эксплуатации.

5. Число точек контроля параметров, необходимых для поддержания эксплуатационных режимов и их изменения (маневрирование), должно быть минимальным.

6. Полная автоматизация управления реактором, включая физический пуск, разогрев, изменение режима работы реактора.

7. Должна быть исследована возможность реализации в управлении энергоблоком АС принципа: «турбина ведет реактор» с учетом коррекции в системе управления по объему отбираемой тепловой мощности для бытовых нужд.

8. Оптимизация управления АС в целом на основе рационального сочетания автоматического и дистанционного управления системами и оборудованием станции.

9. Исключение перезарядок реактора за весь проектный срок службы АС.

10. Герметичность второго контура по нормам первого контура (с поправкой на давление P_{II}).

11. Упрощенная технология утилизации РУ.

12. Минимизация доли заменяемого оборудования или его элементов за проектный срок службы энергоблоков АС. Как следствие, определяются и соответствующие параметры ресурсной надежности оборудования и систем.

13. Проектный срок службы АС устанавливается по материалам концептуального проекта, включая технико-экономические показатели.

14. Минимизация строительных и монтажных работ на строительной площадке АС.

15. Разработка организационно-технических мероприятий, обеспечивающих предельно возможное уменьшение численности эксплуатационного и обслуживающего персонала АС.

Возможны две схемы исполнения турбины-генератора:

А – Турбина-генератор – единый герметичный агрегат. Генератор может быть асинхронным или синхронным. (В этом случае есть прецедент – опыт ОКБМ.)

Б – Турбина и генератор – различные агрегаты: турбина герметична, а генератор – негерметичный. Ротор генератора вращается турбиной либо через уплотнения вала турбины, либо через электромагнитную муфту.

Питательный и конденсатный насосы. Их параметры должны оптимизироваться с учетом параметров турбины из условия максимальной ресурсной надежности при приемлемых значениях термодинамического КПД.

Возможность создания герметичных насосов второго контура с высокими техническими показателями, включая ресурсные характеристики, подтверждается опытом ОКБМ по созданию насосов первого контура.

Количество арматуры по всем контурам (первого, второго, третьего) должно быть минимальным, и она должна быть герметичной. Опыт создания герметичной арматуры в ОКБМ имеется.

Третий контур обеспечивает охлаждение оборудования. Контур должен быть плотным и желательно на естественной циркуляции. Теплоотвод от третьего контура – в окружающую среду.

Аварийное расхолаживание должно обеспечиваться за счет радиаторов в атмосферу.

К вопросу об экономической эффективности АЭС малой мощности¹

К настоящему времени выявлено достаточно много потенциальных потребителей электрической и тепловой энергии с мощностью энергопотребления несколько тысяч киловатт (до 10–15 МВт). Это характерно в первую очередь для районов, удаленных от электросетей и других централизованных энергоисточников, таких, например, как Якутия, Северо-восток Сибири и др. Такие потребители сейчас обеспечиваются привозным органическим топливом, доставка которого зачастую связана со значительными трудностями и затратами. Поэтому актуальность разработки проектов АЭС малой мощности для удаленных регионов не вызывает сомнений.

Однако при детальном рассмотрении этой задачи возникает несколько специфических вопросов, без решения которых едва ли можно рассчитывать на широкое внедрение малой энергетики в экономику. К числу этих вопросов относятся:

- необходимость снижения стоимости вырабатываемой энергии, которая при прочих равных условиях для АЭС малой мощности будет значительно больше, чем для АЭС средней и большой мощности;
- обеспечение квалифицированными кадрами для эксплуатации малых АЭС в удаленных районах (по традиционной схеме это, по-видимому, невозможно по социальным причинам).

Улучшение экономических характеристик АЭС малой мощности возможно при условии существенного снижения капитальных затрат на сооружение АЭС, комплексного использования тепловой и электрической энергии и уменьшения эксплуатационных затрат (при выполнении всех требований по безопасности).

Значительного снижения капитальных затрат можно ожидать за счет максимального упрощения схемных и конструктивных решений с ориентацией на изготовление всего энергоблока в заводских условиях и предельного сокращения объема монтажных работ на строительной площадке за счет блочной поставки систем и оборудования. Соответствующие проектные разработки подтверждают техническую возможность скомпоновать энергоблок АЭС в 3–4 транспортельных блока.

¹ Журнал «Атомная энергия», т. 75, вып. 5, ноябрь 1993, с. 333–336. Авторы: Митенков Ф.М., Востоков В.С., Дрожжин В.Н., Самойлов О.Б.

Кардинальное снижение эксплуатационных затрат представляется возможным при отказе от постоянного пребывания эксплуатационного персонала на станции. Это предполагает такие технические решения энергоблока, при которых длительная работа станции может поддерживаться в автоматическом режиме. При таком режиме эксплуатации контроль за работой АЭС будет обеспечиваться из центра телеметрического контроля, размещаемого на значительном удалении от АЭС и обслуживающего группу таких станций. По-видимому, нет необходимости подчеркивать, что оборудование и системы АЭС с такой схемой управления должны удовлетворять дополнительным требованиям по ресурсной надежности, обслуживанию и др. В частности, представляется оправданным исключение периодической перегрузки реактора в процессе длительной эксплуатации, поскольку ее проведение связано с большим числом операций, трудно поддающихся автоматизации и дистанционному управлению. Решение задачи единовременной загрузки ядерного топлива на весь срок службы реактора (например, на 25–30 лет) для рассматриваемой мощности не представляет технических трудностей. Исключение периодической перегрузки реактора не только упрощает и удешевляет обслуживание АЭС, но и снижает капитальные затраты, поскольку нет необходимости строить хранилище для отработавших ТВС и предусматривать их транспортирование. Снижение эксплуатационных расходов при прочих равных условиях существенно зависит от состава, номенклатуры оборудования и систем. Особую важность в связи с этим приобретает оптимизация схемы энергоблока, состава оборудования при выполнении всех требований по безопасности.

Предпочтительно использовать естественную циркуляцию теплоносителя в реакторе. Это позволяет исключить из состава механические циркуляторы в первом контуре. Интегральная компоновка первого контура обеспечивает наиболее простую схему циркуляции. При этом одновременно упрощается блочная поставка энергоблока заводом-изготовителем. Кроме того, при интегральной компоновке возможно использование страховочного корпуса, с помощью которого безопасность достигается и обосновывается наиболее просто.

По опыту эксплуатации АЭС известно, что паротурбинный комплекс требует большого внимания и участия эксплуатационного персонала как в профилактических мероприятиях, так и текущем ремонте оборудования. Заметное упрощение схемы паротурбинного комплекса при одновременном повышении его надежности и уменьшении объема профилактических работ достигается, если выполнить второй контур установки, включая турбогенератор электрического тока, герметичным. Такая схема разработана в ОКБМ. Конструкция необходимого

оборудования герметичного исполнения отработана (асинхронный турбогенератор, питательный и конденсатный насосы, паровой конденсатор, арматура и др.). Опытные образцы указанного оборудования прошли представительные испытания, испытана и схема герметичного второго контура в целом в составе проектного комплекса оборудования.

С точки зрения простоты и надежности управления необходимо в максимальной степени реализовать в ЯЭУ саморегулирующие свойства. В этом случае в установке в рабочих режимах в действии остается лишь один автоматический регулятор, а именно регулятор оборотов турбогенератора, поддерживающий частоту генерируемого электротока. После пуска реактора и разогрева до рабочих параметров маневрирование обеспечивается за счет саморегулирования в режиме «турбина ведет реактор», то есть реактор отслеживает нагрузку со стороны потребителей.

В целом система автоматического управления должна отвечать самым высоким требованиям по надежности и, в частности, обеспечена самопроверкой в процессе функционирования по назначению. Система аварийной защиты и расхолаживания реактора должна удовлетворять в полной мере нормативным требованиям и построена на пассивных принципах: ее срабатывание (включение) и функционирование по назначению происходят без потребления энергии извне и вмешательства операторов. Система защитных барьеров, отвращающая радиоактивное загрязнение окружающей среды при проектных и запроектных (технически возможных) авариях, должна базироваться на технических решениях, отработанных для реакторов с интегральной компоновкой оборудования со страховочным корпусом.

АЭС, построенные на рассмотренных принципах, будут отвечать требованиям автономности и не будут нуждаться в постоянном присутствии эксплуатационного персонала. Периодический контроль специалистов обеспечит необходимый уровень профилактического обслуживания. При оценке экономических характеристик АЭС малой мощности есть основания ожидать значительной экономии средств за счет:

- блочного изготовления энергоустановки в заводских условиях и сокращения сроков сооружения и монтажных работ на строительной площадке;
- исключения перегрузки реактора;
- исключения значительных затрат на создание социальной инфраструктуры;
- резкого сокращения эксплуатационных затрат.

Выполненные оценки с учетом высказанных соображений позволяют утверждать, что АЭС малой мощности могут иметь существенные технико-экономические преимущества перед соответствующими энергоисточниками на органическом топливе.

Некоторые вопросы технико-экономической оптимизации атомной энергетики¹

1. Имеются основания считать, что к настоящему времени закончился начальный этап развития и стабилизации атомной энергетики. Этот этап не только подтвердил возможность широкомасштабного развития атомной энергетики, но и позволил сформулировать необходимые условия такого развития. К числу определяющих условий, в первую очередь, относятся: гарантированная безопасность атомной энергетики для окружающей среды и населения и технико-экономическая конкурентоспособность по отношению к любым другим основным видам энергоисточников.

2. В отношении безопасности международным сообществом к настоящему времени выработаны требования и критерии, строгое выполнение которых, несомненно, гарантирует необходимый уровень безопасности. Здесь усилия проектантов, изготовителей оборудования и строителей будут направлены на поиск и реализацию наиболее оптимальных, эффективных и в техническом, и в экономическом плане решений. Мне представляется, что наибольшие трудности на этом пути, по-видимому, встретятся при решении проблемы обращения с отработавшим топливом.

3. Успешная технико-экономическая оптимизация большой атомной энергетики предполагает системный подход с охватом всех аспектов создания, эксплуатации объектов атомной энергетики и проявления последствий их функционирования в окружающей среде.

Актуальные проблемы создания большой атомной энергетики:

- обоснованное определение структуры атомной энергетики будущего, признанное на международном уровне;
- обоснованный выбор направлений совершенствования объектов атомной энергетики в целях повышения ее эффективности;
- технико-экономическая оптимизация в обеспечение конкурентоспособности атомных энергоисточников.

¹ Тезисы сообщения на совещании у академика Е.П. Велихова с участием представителей Национальных лабораторий Сандиа (США), 17–19.09.2003

4. Большая атомная энергетика, на мой взгляд, неизбежно будет развиваться на основе замкнутого топливного цикла. Это в значительной степени будет определять структуру атомной энергетике в целом. Конечно, переход на замкнутый топливный цикл будет не вдруг, а поэтапным.

5. Развитие, совершенствование атомной энергетике в большой степени будет определяться используемыми типами реакторов. В течение ближайших десятилетий по-прежнему будут доминировать водо-водяные реакторы, но, несомненно, в эти же годы должны и будут появляться новые типы реакторов, значительно превосходящие существующие по технико-экономическим показателям. Хорошо известно, что уже идут достаточно интенсивные поиски новых типов реакторов. И что примечательно при этом: наблюдающаяся консолидация усилий специалистов разных стран с начальных стадий поиска нового, что лишний раз подтверждает, что атомная энергетика – проблема интернациональная.

Мне представляется, что весьма перспективными могут оказаться водо-водяные реакторы на закритических параметрах, быстрые реакторы с различными теплоносителями (натрий, гелий, возможно, и вода закритических параметров), реакторы с солевым теплоносителем.

6. Принципиально важными являются вопросы технико-экономической оптимизации. Известно, что на начальном этапе становления атомной энергетике экономика не всегда была определяющей при выборе проектных решений. И это, вообще говоря, оправдано и характерно при появлении принципиально новых направлений в любой области техники. Но, если говорить уже о развитии большой атомной энергетике, то, несомненно, что экономический фактор должен быть и будет определяющим при прочих равных условиях.

Накопленный к настоящему времени мировой опыт проектирования, строительства и эксплуатации АЭС с реакторами различных типов позволяет считать, что имеется необходимая база данных для оценки необходимых экономических характеристик проектируемых новых АЭС на всех стадиях создания, эксплуатации и утилизации и, следовательно, имеются условия для технико-экономической оптимизации как составных частей, так и системы в целом.

7. Одной из наиболее уязвимых особенностей атомной энергетике являются большие значения удельных капитальных затрат. Эта особенность, по-видимому, сохранится и впредь.

Снижение капитальных затрат при прочих равных условиях может быть достигнуто: на стадии проектирования – за счет снижения материалоемкости, максимального использования (но не в ущерб, конечно, качеству) унифицированных решений и стандартизованных

проектов, систем, оборудования, а также за счет разработки оптимальной технологии строительных и монтажных работ для сокращения сроков строительства; на стадии изготовления — за счет серийности производства, совершенствования технологий изготовления, специализации производства.

Весьма целесообразно из экономических и технических соображений стремление к максимально возможному выполнению работ по изготовлению оборудования и систем в заводских условиях, в пределах ориентируясь на модульную поставку. Это обеспечит и более высокое качество строительно-монтажных работ, и существенное сокращение сроков.

Очевидно, что значительная часть из указанных факторов снижения капитальных затрат может проявиться только при переходе к серийному производству. При этом следует помнить, что серийность исключает длительные перерывы в производстве.

Увеличенные удельные капитальные затраты в значительной степени могут быть скомпенсированы за счет ориентации на использование реакторов большой мощности и на значительное увеличение сроков службы по сравнению с традиционной энергетикой (60–100 лет).

Последнее предполагает значительное повышение ресурсных характеристик основного оборудования и его надежности, поскольку частый ремонт и частичная замена оборудования, в принципе, могут свести «на нет» выигрыш от заявленного увеличения срока службы энергоблока в целом.

8. У меня не вызывает сомнений принципиальная возможность практического обеспечения высокой экономической эффективности и конкурентоспособности большой атомной энергетики по отношению к традиционной. Но для этого целесообразно разрабатывать уже сейчас концепцию большой атомной энергетики с тем, чтобы принципиальные требования к составляющим объектам базировались на положениях концепции. Это позволит сузить фронт поисков при разработке проектов новых АЭС и других объектов, ускорить сроки их создания, существенно уменьшить затраты.

Реакторные установки малой мощности типа АБВ¹

Атомные станции малой мощности, являясь высоконадежными и экологически чистыми энергоисточниками, способны удовлетворить потребности в тепловой и электрической энергии небольших поселков, объектов горнодобывающей промышленности, геологических партий, размещенных в отдаленных и изолированных от систем централизованного энергоснабжения районах страны (Крайний Север, Сибирь, Дальний Восток). При необходимости они могут быть использованы и для получения пресной воды².

В ОКБМ разработана конструкция реакторной установки (РУ) малой мощности типа АБВ, предназначенной для работы в составе автономных энергоблоков малой мощности.

В проект РУ АБВ заложены наиболее изученные, технически освоенные конструктивные решения и технологии, принятые для реакторов типа ВВЭР, а также силовых установок атомных ледоколов. Все оборудование РУ АБВ либо имеет прямые прототипы, работоспособность и надежность которых подтверждена опытом эксплуатации, либо находится в стадии отработки, заключающейся в создании опытных образцов и их испытаний на стендах ОКБМ и его контрагентов. Предусмотрена возможность использования РУ АБВ в составе как наземной, так и плавучей АС. К достоинствам РУ АБВ относятся:

- возможность поставки оборудования РУ компактными транспортными блоками и модулями максимальной заводской готовности (как для плавучего, так и для наземного варианта станций), что позволяет значительно уменьшить объем строительно-монтажных работ и сохранить продолжительность сооружения станций;
- существенное упрощение систем аварийного отвода тепловой энергии благодаря свойствам внутренней самозащищенности и относительно малой мощности реактора;

¹ Журнал «Энергетическое строительство», № 5, 1993, с. 21–27. Авторы: Ф.М. Митенков, Ю.К. Панов, О.Б. Самойлов, В.Л. Малюгин, Н.В. Скворцов.

² См. статью Ф.М. Митенкова, А.А. Ардабьевского и др. «Ядерная паропроизводящая установка повышенной безопасности типа КЛТ-40», опубликованную в том же номере журнала «Энергетическое строительство»

- отсутствие радиоактивного загрязнения атмосферы при работе станций, что обусловлено наличием комплекса защитных систем, локализирующих барьеров и относительно малым количеством радиоактивных материалов, используемых в процессе эксплуатации.

Основные технические характеристики РУ приведены ниже:

Тип реактора	Интегральный <i>PWR</i>
Тепловая мощность, МВт	38
Циркуляция теплоносителя	Естественная
Диапазон маневрирования мощностью, % $N_{ном}$	10–100
Параметры теплоносителя первого контура: давление, МПа температура на выходе из активной зоны, °С	15,4 327
Объем первого контура, м ³	12
Паропроизводительность ПГ, т/ч	53
Параметры теплоносителя второго контура (пара): давление, МПа температура, °С	3,14 290
Скорость нормального регулирования паропроизводительности, %/с	0,5
Продолжительность периода непрерывной работы без непосредственного обслуживания, ч	8000
Временной интервал между перегрузками активной зоны, лет	4-5
Проектный срок службы установки, лет	До 50
Срок службы заменяемого оборудования до заводского ремонта, лет	Не менее 10
Сейсмостойкость оборудования по шкале MSK-64, баллы	9*
* Максимальное проектное землетрясение	

Схемно–конструктивные решения

Реакторная установка – это комплекс систем и оборудования, совместная работа которых обеспечивает надежное и безопасное получение пара требуемых параметров.

Первый контур РУ предназначен для получения тепловой энергии в активной зоне (АЗ) реактора и передачи ее теплоносителю второго контура. Он представляет собой герметичную замкнутую систему, рассчитанную на работу под высоким давлением. В качестве теплоносителя первого контура используется вода высокой чистоты.

В состав первого контура входят:

- основной контур циркуляции;
- система компенсации давления;
- система очистки и расхолаживания.

Основной контур, заключенный в корпусе реактора, включает в себя активную зону, парогенератор (ПГ), подъемные и опускные участки циркуляции. Циркуляция теплоносителя в пределах основного корпуса при всех режимах работы РУ – естественная.

Система компенсации давления принята газовой (рабочий газ – азот). В состав системы входят: компенсаторы давления, рабочие и резервная группы газовых баллонов, трубопроводы с запорной арматурой, контрольно-измерительные приборы. Объем газа в системе при работе установки в базовом режиме – около 3,5 м³.

Система очистки и расхолаживания, предназначенная для поддержания требуемого качества воды первого контура и снятия остаточного тепловыделения в АЗ, включает в себя холодильник системы очистки, ионообменный фильтр, насос системы очистки. Холодильник выполнен двухсекционным, причем мощности одной секции достаточно для обеспечения расхолаживания РУ. Отвод тепловой энергии от холодильника осуществляется водой контура охлаждения оборудования. Включение ионообменного фильтра в работу предусматривается при повышении радиоактивности теплоносителя первого контура.

Назначение второго контура – отвод тепловой энергии от первого контура в нормальных и аварийных режимах, подача питательной воды в секции ПГ и получение в них пара требуемых параметров. В состав этого контура входят контур генерации пара и система аварийного расхолаживания.

Контур генерации пара состоит из четырех циркуляционных петель, к каждой из которых подключена одна секция ПГ. Трубопроводы пара и воды оснащаются двойной запорной арматурой. Благодаря наличию нескольких самостоятельных контуров обеспечивается высокая эксплуатационная гибкость агрегата: при работе реактора любую из петель можно отключить, что не приводит к необходимости останова реактора. Для контроля герметичности секций ПГ предусмотрено непрерывное изменение активности пара в паропроводах после ПГ.

Система аварийного расхолаживания служит для отвода тепловой энергии от первого контура при авариях с полным обесточиванием установки и увеличением давления в первом контуре. Она включает в себя баки запаса воды, трубопроводы с запорной арматурой, механические фильтры, контрольно-измерительные приборы. Система, подключенная непосредственно к секциям ПГ, вводится в действие без участия обслуживающего персонала по сигналам, поступающим

от автоматизированной системы управления РУ. Пар, образующийся в процессе аварийного расхолаживания, выбрасывается в атмосферу.

Контур охлаждения оборудования РУ выполнен автономным и предназначен для съема тепловой энергии в холодильнике системы очистки в режимах очистки и нормального расхолаживания установки. Отвод тепловой энергии от контура охлаждения оборудования осуществляется технической или морской водой.

Реактор – водо-водяной интегрального типа с естественной циркуляцией теплоносителя первого контура во всем диапазоне изменения мощности. Газовая система компенсации давления вынесена за пределы реактора. Все патрубки второго контура и систем первого контура расположены в верхней части корпуса реактора.

Трубная система ПГ размещена в верхней части кольцевого пространства между выемным блоком и корпусом реактора. Она состоит из секций, каждая из которых в свою очередь – из нескольких кассет.

Органы СУЗ разбиты на группы, имеющие индивидуальные приводы. При обесточивании двигателей приводов группы органов СУЗ «самоходом» вводятся в активную зону.

Основные технические данные реактора:

Габариты корпуса реактора, мм:	
высота	4800
диаметр	2600
Объем реактора, м ³	7,8
Масса, т	76
Назначенный срок службы, лет	До 50

Активная зона (гетерогенная, на тепловых нейтронах) набрана из ТВС шестигранного профиля. В каждой ТВС, за исключением центральной, расположен орган СУЗ, состоящий из поглощающих элементов (стержней), заполненных карбидом бора.

Для компенсации запаса реактивности реактора в части каналов ТВС размещены стержни с выгорающим поглотителем.

Для управления и контроля за пуском реактора из подкритического состояния часть каналов ТВС снабжена «внешними» источниками нейтронов – стержнями, заполненными бериллийсодержащими материалами.

Конструкция ТВС исключает несанкционированное перемещение органов СУЗ во время выполнения технологических операций.

Характеристики активной зоны:

Средняя энергонапряженность, МВт/м ³	43
Диаметр, мм	1225
Высота, мм	850
Количество ТВС, шт.	55
Кампания, ч	До 22 000

Управление всем комплексом технических средств атомной станции с РУ АБВ автоматизировано и осуществляется с пульта центрального поста управления. На пульте размещены оперативные органы управления, контроля и сигнализации, цифровые табло с блоками вызова, дисплей с клавиатурой.

При выходе из строя центрального поста останов реактора и его расхолаживание производятся с резервного поста управления. Для глушения реактора при отклонении технологических параметров РУ от установленных пределов предусматривается также использование самосрабатывающих устройств.

Контроль, оценка и прогнозирование изменения технического состояния элементов РУ осуществляются с помощью комплекса технической диагностики. Комплекс позволяет обнаружить и распознать аномальные ситуации в ходе технологического процесса и проанализировать причину их появления, обеспечивает информационную и экспертную поддержку оператору в управлении установкой, в том числе формирование «советов» по восстановлению нормального технологического режима, приведению РУ в безопасное состояние и т. д.

Компоновка основного оборудования

Благодаря принятой компоновке оборудования РУ поставка его на строительную площадку может осуществляться крупными монтажными блоками повышенной заводской готовности. Основным крупным блоком является парогенерирующий аппарат (ПГА), в состав которого входит все оборудование первого контура: интегральный реактор, компенсаторы давления, фильтр, холодильник системы очистки, электронасос системы очистки и расхолаживания, блоки первичной биологической защиты, трубопроводы с арматурой. Все перечисленное оборудование komponуется на баке металловодной защиты (МВЗ). При демонтированных исполнительных механизмах СУЗ и без активной зоны парогенерирующий агрегат массой 185 т может транспортироваться по железной дороге.

По желанию заказчика оборудование может быть поставлено более мелкими блоками, а также отдельно.

Дополнив блок ПГА, который является унифицированным, другими, более мелкими блоками, можно получить модуль РУ. Корпус модуля предназначен для локализации аварии с разгерметизацией первого контура. Биологическая защита модульной остановки выполняется с применением традиционных материалов: воды, бетона, стали, свинца.

Модуль может иметь вид цилиндрического контейнера диаметром 8,5 и длиной 13 м, массой (с учетом корпуса) 600 т или параллелепипеда длиной 5,1 м, шириной 4 и высотой 7,5 м (габариты модуля могут быть иными, они зависят от компоновки станции).

Для атомных станций, сооружаемых в отдаленных районах, где продолжительность и стоимость возведения АС определяется главным образом трудоемкостью строительно-монтажных работ, предпочтителен модульный вариант РУ АБВ, позволяющий максимально сократить объем этих работ.

По оценке Нижегородского отделения «Спецтяжавтотранса» (организации, специализирующейся на транспортировании крупногабаритных и тяжеловесных грузов), модули стационарной и плавучей АС могут быть доставлены к месту строительства объекта автомобильным и водным транспортом.

Выполненные для АС с двумя РУ АБВ разработки показывают, что стационарная (наземная) станция может быть размещена на площади около 7 га, плавучая – на судне водоизмещением 8000–9000 т.

Безопасность. Безопасность РУ АБВ обеспечивается присущими ей свойствами самозащищенности и наличием систем безопасности, выполняющих основные функции защиты (останов реактора, отвод остаточного тепловыделения и локализация радиоактивности) без вмешательства эксплуатационного персонала и при отсутствии внешних источников энергии¹.

Самозащищенность реакторной установки достигается за счет:

- реализации свойств саморегулирования и самоограничения мощности реактора, предопределенных отрицательными значениями коэффициента реактивности (мощностного, парового, температурного по топливу и теплоносителю) во всем диапазоне изменения технологических параметров реактора;
- естественной циркуляции теплоносителя первого контура во всех режимах эксплуатации (это позволило упростить циркуляционную схему первого контура, исключив из нее циркуляционные насосы);
- относительно малой мощности реактора и, соответственно, малых остаточных тепловыделений, сравнимых с мощностью рассеивания в окружающую среду, большой теплоаккумулирующей способности реактора, большого запаса времени для анализа аварийных ситуаций и (при необходимости) управления аварией.

В целях повышения безопасности реактора предусмотрено значительное резервирование (шесть групп) рабочих органов системы управления и защиты реактора. Введение рабочих органов в активную зону осуществляется как с использованием электропривода, так и самоходом под действием нагрузки от собственной массы при обесточивании приводов. Обесточивание приводов может быть осуществлено устройством прямого действия, срабатывающим при повышении давления в первом контуре.

При невозможности введения рабочих органов СУЗ в активную зону (гипотетический случай) используется страховочная система ввода жидкого поглотителя, обеспечивающая глушение реактора.

Отвод тепловой энергии от активной зоны в нормальных условиях производится через паротурбинную установку и теплообменник системы очистки первого контура, в экстремальных – с помощью системы аварийного расхолаживания (САР). Эффективность работы САР такова, что запаса воды в одном баке (2 м^3) достаточно для расхолаживания РУ до степени, при которой поддержание РУ в безопасном состоянии обеспечивается за счет рассеяния тепловой энергии в окружающее пространство через бак МВЗ и другие устройства в течение неограниченного времени.

Для предотвращения возможности распространения ионизирующих излучений и радиоактивных веществ в окружающую среду предусмотрен последовательный ряд независимых физических барьеров, таких, как герметичные оболочки твэлов, герметичный корпус реактора и вся система первого контура, герметичный корпус модуля.

На трубопроводах систем, смежных с первым контуром, установлена двойная локализирующая арматура с пневмоприводом, что позволяет при обнаружении течи локализовать любое разгерметизированное оборудование. Для снижения давления среды в защитной оболочке, а также предотвращения распространения радиоактивности при авариях с потерей теплоносителя вводится в действие система снижения давления с барботажной емкостью.

Наличие указанных барьеров, использование средств физической защиты, реализация свойств самозащищенности реактора, резервирование систем безопасности – все это в совокупности гарантирует безопасность АС при числе отказов, значительно превышающем нормативное (единичный отказ). Даже при запроектных авариях максимальная дозовая нагрузка на население, проживающее на расстоянии 0,3–10 км от объекта, не превысит $20 \cdot 10^{-5}$ Зв, что составляет менее 10 % дозы от естественного радиационного фона.

При разработке РУ АБВ руководствовались требованиями по обеспечению безопасности отечественной нормативно-технической

документации (ОПБ-88, ПБЯ РУ АС-89), рекомендациями и действующими нормами безопасности (в основном, радиационной) МАГАТЭ (N50-C-QA), международного стандарта ИСО серии 9000 и отечественного ГОСТ 40.9001-88.

В результате принятые в проекте технические решения обеспечивают вероятность разрушения активной зоны в пределах 10^{-8} – 10^{-6} на реакторо-год в зависимости от исполнения систем безопасности.

Уровень радиационного воздействия на персонал станции с РУ АБВ, как показывают оценочные расчеты, будут существенно ниже регламентируемого общепринятыми нормами государств-членов МАГАТЭ. Среднегодовая дозовая нагрузка на персонал составит не более $0,5 \cdot 10^{-2}$ Зв, что ниже регламентированного СПАЭС-88 значения, составляющего 0,1 Зв. Индивидуальная доза облучения населения в этом случае не превысит $1 \cdot 10^{-5}$ Зв за первый год после аварии, то есть практически не увеличит дозовой нагрузки от естественного радиационного фона.

Таким образом, в случае как проектных, так и запроектных аварий риск опасного для здоровья людей повышения радиоактивности настолько мал, что позволяет не рассматривать вопрос эвакуации населения в качестве средства защиты населения и исключает какие-либо ограничения на размещение РУ АБВ вблизи населенных пунктов.

Обращение с радиоактивными отходами и вывод станции из эксплуатации. Ввиду небольшой мощности РУ, малых объемов оборудования и систем первого контура, содержащих радиоактивный теплоноситель, а также вследствие принятых конструктивно-компоновочных решений количество образующихся при эксплуатации АС с РУ АБВ радиоактивных отходов (РАО) невелико. Так, при перегрузках активной зоны общая масса удаляемых твердых высокоактивных отходов составит не более 650 кг. При плановых (заводских) ремонтах (1 раз в 10 лет) общая масса радиоактивно загрязненного оборудования, выработавшего эксплуатационный ресурс и подлежащего замене, составит 19 т. Благодаря незначительному количеству РАО существенно упрощается решение вопросов, связанных с их сбором, переработкой, захоронением или последующим использованием.

Вывод из эксплуатации наземной АС выполняется в целях либо полной ее ликвидации, либо перепрофилирования. При полной ликвидации АС после выдержки в течение необходимого времени и демонтажа оборудования должны быть приняты меры по восстановлению площадки станции, наземных и подземных водных экосистем до состояния, при котором допускается природопользование и проживание населения без каких-либо ограничений.

Следует отметить, что вывод из эксплуатации плавучей станции требует существенно меньше времени и меньших трудозатрат, поскольку она может быть отбуксирована для утилизации на специализированные предприятия непосредственно сразу после прекращения ее эксплуатации. Акватория, где размещалась АС, и прилегающая территория практически сразу после ее ликвидации без каких-либо ограничений могут использоваться в хозяйственных целях и для проживания населения.

Учитывая изложенное, можно сказать, что АС с РУ АБВ является экологически чистым источником электрической и тепловой энергии.

Выводы

1. Атомные станции с РУ АБВ отличаются повышенной безопасностью, что достигается благодаря развитым свойствам внутренней самозащищенности реакторной установки и оснащению ее пассивными системами безопасности прямого действия, выполняющими основные функции по глушению реактора, теплоотводу от активной зоны и локализации активного теплоносителя.

2. Самая тяжелая запроектная авария не вызывает сколько-нибудь заметного изменения естественного радиационного фона на расстоянии 0,3–1 км от АС, что исключает какие-либо ограничения по размещению станции вблизи населенных пунктов.

3. Отработанность технических решений и технологий, заложенных в проект, сводит к минимуму необходимый объем НИОКР и позволяет реализовать проект в кратчайшие сроки без создания демонстрационного прототипа. При строительстве станции методом крупноблочного монтажа (с использованием модулей максимальной заводской готовности) она может быть сооружена за 3–5 лет.

Атомные станции теплоснабжения – новый этап в развитии атомных станций в СССР¹

Существующие тенденции в развитии атомной энергетики не оставляют сомнений в том, что она будет занимать все большее место в мировом энергообеспечении.

Тяжелые аварии на АЭС «Три-Майл-Айленд» (США) и Чернобыльской АЭС (СССР) выявили необходимость существенного повышения уровня безопасности АС, но не поколебали утверждения о неизбежности широкого использования ядерной энергии в долгосрочной перспективе. Действительно, реальной альтернативы для решения ресурсных и экологических проблем, связанных с использованием органического топлива, по меньшей мере на ближайшие десятилетия, нет. Выполненные после чернобыльской катастрофы исследования как в нашей стране, так и за рубежом дали положительный ответ на вопрос о возможности создания практически безопасных АС и позволили сформулировать необходимые условия, которым они должны отвечать.

К настоящему времени ядерная энергия используется в основном для выработки электроэнергии, а также в корабельных и судовых энергоустановках. Однако на выработку электроэнергии в стране тратится лишь около 25 % общего топливопотребления. Значительно большая доля топлива идет на коммунальное и промышленное теплоснабжение и на транспорт. Поэтому определяющий вклад атомной энергетики в решение экологической проблемы возможен только при комплексном вытеснении органического топлива из всех основных областей его потребления. Ведущиеся работы по созданию реакторов различного назначения в СССР, США, Японии, Франции, Великобритании, ФРГ и других странах подтверждают реальность технического решения этой задачи.

Известно, что на коммунальное теплоснабжение в нашей стране тратится примерно 30 % органического топлива. В крупных городах источники коммунального и промышленного теплоснабжения наряду с транспортом определяют загрязненность воздушного бассейна,

¹ Журнал «Теплоэнергетика», № 8, 1990, с. 12–17. Автор – Митенков Ф.М.

которая во многих случаях превышает допустимые пределы. Поэтому создание безопасных атомных станций для теплоснабжения крупных городов является весьма актуальной задачей.

В обычной энергетике для централизованного теплоснабжения используют ТЭЦ или котельные. Соответственно, при использовании атомной энергии можно ориентироваться либо на АТЭЦ, либо на атомные котельные – АСТ (атомные станции теплоснабжения). Каждый из этих вариантов имеет свои преимущества и недостатки. Применение АТЭЦ допускает более полное использование мощности реактора в течение года, и это экономически выгодно. Однако на размещение АТЭЦ, согласно действующим нормативам, накладываются существенные ограничения, вытекающие из необходимости соблюдения допустимых (довольно больших) расстояний от границы города, объемов теплового сброса, расходов охлаждающей воды, а также сооружения специальных прудов-охладителей и др.

Для АСТ, имеющих значительные преимущества по уровню безопасности из-за низких технологических параметров (см. таблицу), компактности, допускается размещение их в непосредственной близости к городу. Для них не нужны пруды-охладители, поскольку отсутствуют какие-либо сбросы тепла в окружающую среду. Однако тепловая нагрузка АСТ неизбежно будет неравномерной в течение года в зависимости от погодных условий.

Параметры	Тип реактора	
	ВВЭР-1000	АСТ-500
Тепловая мощность, МВт	3000	500
Давление теплоносителя p_1 , МПа	16,0	2,0
Температура теплоносителя на выходе из реактора, °С	320	208
Энергонапряженность активной зоны, кВт/л	110	27

Несмотря на это, перечисленные достоинства АСТ столь существенны, что следует ожидать их широкого использования при условии полного решения вопросов безопасности и приемлемых технико-экономических характеристиках. Ниже дается краткое описание технических решений, использованных в реакторной установке АСТ-500, которые делают эту станцию практически безопасной¹.

¹ Экспертные группы МАГАТЭ, проводившие в 1989 г. экспертизу проекта Горьковской АСТ (ГАСТ) и его исполнения, подтвердили в своем заключении высокий уровень безопасности этой станции

Схема передачи тепловой энергии в АСТ

Относительно низкие параметры теплоносителя в реакторе, последовательная передача тепловой энергии от реактора до потребителя без преобразования ее в другие виды энергии позволяют существенно упростить схему и конструкцию АСТ по сравнению с АТЭЦ и одновременно обеспечить более высокий уровень безопасности.

В составе станции три основных контура циркуляции: первый, промежуточный и контур сетевой воды. Первый контур является основным контуром циркуляции водяного теплоносителя, который целиком замыкается в реакторе. Кроме того, он включает компенсатор объема, систему очистки и подачи охлаждающей воды в механизмы приводов СУЗ, систему поддержания газохимических параметров теплоносителя, бак запаса раствора бора, арматуру, насос подпитки. Промежуточный контур состоит из трех идентичных автономных петель циркуляции. Каждая из них имеет в составе теплообменник первого—второго контуров, герметичный циркуляционный насос, сетевой теплообменник, компенсатор объема промежуточного контура, предохранительный клапан, насос подпитки. К каждой петле промежуточного контура подключена система аварийного расхолаживания, в состав которой входят: теплообменник расхолаживания, емкость запаса воды, арматура. Сетевой контур включает сетевые теплообменники второго—третьего контуров, насосы сетевого контура, городскую теплотсеть, отсекающую арматуру, тепlopункты. Кроме перечисленных, имеются традиционные обеспечивающие (вспомогательные) системы.

Принципиальные особенности структуры и схемы АСТ следующие:

- локализация радиоактивного теплоносителя в объеме корпуса реактора;
- наличие промежуточного контура, являющегося дополнительным барьером между радиоактивным первым контуром и чистым сетевым;
- максимальное использование пассивных средств безопасности, особенно в системе аварийного расхолаживания, не требующих для своего функционирования подвода энергии извне и управляющих воздействий;
- резервирование систем теплоотвода и систем аварийного расхолаживания;
- отсутствие предохранительного клапана в первом контуре.

Во втором контуре давление поддерживается ниже давления в реакторе ($p_{II}=1,2$ МПа) и ниже давления в сети ($p_{III}=2$ МПа). Это, наряду с предусмотренными защитными воздействиями управляющих систем, исключает радиоактивное загрязнение сетевого контура при появлении неплотности в теплообменнике первого—второго контуров.

Принципиальным является отказ от принудительной циркуляции теплоносителя в реакторе. Это решение привело к увеличению габаритов реактора, но позволило уменьшить энергопотребление на внутренние нужды, существенно упростить эксплуатацию. В целом отказ от принудительной циркуляции в реакторе, безусловно, повысил надежность и безопасность станции.

Исключение предохранительного клапана в первом контуре диктуется стремлением свести к минимуму вероятность выброса радиоактивности из реактора. Предотвращение роста давления в проектных аварийных режимах АСТ достигается путем надежного теплоотвода от активной зоны во второй контур через резервированные каналы охлаждения. При гипотетических (запроектных) авариях при повышении давления свыше 4 МПа раскрываются фланцевые разъемы реактора, выполняя функции предохранительных устройств.

Возможность предложенного способа защиты от переопрессовки обусловлена большой теплоаккумулирующей способностью первого контура, «жесткой» тепловой связью второго и третьего контуров, гарантированной надежностью теплоотвода от второго контура.

Конструкция реактора АСТ-500

Принципиальной особенностью конструкции реактора АСТ-500 является размещение теплообменников и компенсатора объема непосредственно в корпусе реактора, который представляет собой герметичный сварной сосуд с фланцевыми разъемами и крышкой. Такое компоновочное решение обеспечило компактность установки, позволило локализовать радиоактивность в ограниченном объеме, исключить трубопроводы большого диаметра (патрубки реактора для теплоносителя первого контура имеют диаметр не более 50 мм). Известно, что разрывы трубопроводов первого контура большого диаметра приводят к наиболее тяжелым последствиям, а их предупреждение существенно усложняет схемы АС, следствием чего является их удорожание. Поэтому исключение трубопроводов первого контура рационально и способствует повышению безопасности.

Единственным отступлением от интегральной компоновки является вынесенная за пределы корпуса реактора система очистки теплоносителя. Однако принятыми конструктивными мерами (подвод к фильтру по схеме «труба в трубе», дублированная отсечная автоматическая арматура внутри страховочного корпуса, размещение системы очистки в герметичном помещении, рассчитанном на избыточное давление) достигается полная компенсация указанного отступления.

Локализация практически всей массы теплоносителя в корпусе реактора обеспечивает большую суммарную теплоемкость, что благоприятно сказывается на протекании переходных и аварийных режимов. Теплообменники первого—второго контуров прямотрубного типа размещены в кольцевом зазоре, образованном внутрикорпусной шахтой, обечайкой блока труб и устройств и корпусом реактора. Трубопроводами второго контура теплообменники объединены в три петли, которые при появлении неплотности в трубной системе могут отсекаются задвижками по входу и выходу теплоносителя промежуточного контура. Верхний объем реактора над уровнем теплоносителя выполняет функцию парогазового компенсатора изменений объема теплоносителя, регулирующего давление в реакторе.

Активная зона реактора набрана из тепловыделяющих сборок каскадного типа. В каждой из них кроме тепловыделяющих элементов с ядерным топливом имеются подвижные регулирующие стержни, составляющие в совокупности органы управления и защиты реактора, которые приводятся в действие электромеханическими приводами.

Для интенсификации естественной циркуляции, а также профилирования расхода теплоносителя по радиусу активной зоны тепловыделяющие сборки снабжены тяговыми трубами. Нейтронно-физический контроль обеспечивается с помощью импульсно-токовых камер, размещенных в реакторе.

Реактор помещен в герметичный страховочный корпус, рассчитанный на давление 1,4 МПа.

Безопасность АСТ

Выше подчеркивалось, что широкое использование АСТ возможно только при гарантированной безопасности. Поэтому на начальном этапе проектирования АСТ-500 (задолго до чернобыльской катастрофы) при выработке и обосновании концепции АСТ-500 были проанализированы известные на тот момент принципы обеспечения безопасности АЭС, технические способы и средства их реализации, опыт эксплуатации АЭС, проводимые организационные мероприятия. В результате этих исследований были сформулированы необходимые условия создания атомных станций с гарантированной безопасностью, которые и были положены в основу разработки проекта АСТ-500.

Потенциальная опасность ядерных энергетических установок определяется принципиальной возможностью выхода из-под контроля реакции деления и выброса в окружающую среду недопустимо больших количеств радиоактивных продуктов в результате аварийной разгерметизации первого контура. Гарантированное исключение таких событий требует схемных и конструктивных решений, не допускающих

реализации состояний, приводящих к возникновению и развитию указанных аварий. Для этого проектные решения должны отвечать следующим основным требованиям:

- реактор должен обладать развитыми свойствами внутренней самозащищенности, то есть при отклонении режима работы в опасном направлении в нем должны возникать внутренние обратные связи, эффективно противодействующие возникшему отклонению и исключающие недопустимые состояния реактора;
- все пути возможного распространения радиоактивности в рабочих и аварийных режимах должны блокироваться системой барьеров, достаточной для гарантированного предупреждения попадания ее к потребителю и исключения радиоактивных выбросов в окружающую среду в количествах, превышающих санитарные нормы;
- средства защиты, предотвращающие выход из-под контроля реакции деления, должны быть в достаточной степени резервированы;
- резервированные средства аварийного расхолаживания должны функционировать на пассивных принципах, то есть включаться без вмешательства оператора и работать без потребления энергии;
- с точки зрения безопасности АСТ как система должна быть устойчивой к ошибкам эксплуатационного персонала.

В настоящее время эти требования получили признание во всем мире и, по существу, являются обязательными при создании реакторов и АЭС нового поколения повышенной безопасности.

Принцип внутренней самозащищенности реактора реализуется физически через оптимизацию состава и структуры активной зоны для обеспечения отрицательных коэффициентов реактивности во всем диапазоне изменения мощности и температуры.

Страховочный корпус, в котором размещается реактор, является важнейшим пассивным локализирующим устройством. Он предотвращает распространение радиоактивности при разгерметизации корпуса реактора и при разрывах труб систем первого контура. Объем страховочного корпуса разделен плотной перегородкой на нижнюю и верхнюю части, которые выбраны так, что при любой разгерметизации корпуса реактора уровень теплоносителя устанавливается выше активной зоны. При этом сохраняется естественная циркуляция в реакторе, и тем самым исключается перегрев твэлов.

При аварийной разгерметизации трубопроводов или оборудования вспомогательных систем первого контура вне страховочного корпуса предупреждение выбросов теплоносителя (радиоактивности) достигается путем срабатывания двойной быстрозапорной герметичной арматуры, размещенной в пределах страховочного корпуса. Срабатывание арматуры не требует подвода энергии. Аналогично

достигается локализация теплоносителя в реакторе при нарушении герметичности теплообменника первого—второго контуров.

Особое место занимает проблема устойчивости по отношению к ошибкам эксплуатационного персонала. Опыт эксплуатации АЭС показывает, что значительная часть аварийных ситуаций происходит именно вследствие таких ошибок. Поэтому при исследовании безопасности АСТ и, в частности, запроектных аварий исходили из того, что отдельные действия персонала могут быть не корректирующими, а усугубляющими аварийную ситуацию. Предотвращение недопустимого развития аварий при выбранном составе оборудования достигнуто использованием защитных средств, выполняющих свои функции независимо от действий персонала, готовности внешнего источника энергии и других условий.

В процессе проектирования АСТ-500 было исследовано большое число аварийных ситуаций, инициированных выходом из строя отдельных систем, оборудования, с разнообразным наложением усугубляющих факторов. Рассматривались и запроектные аварии, вероятность реализации которых менее 10^{-7} 1/год. Ни одна из рассмотренных аварий не приводила к недопустимым радиационным последствиям. Таким образом, можно констатировать, что при разработке АСТ-500 найдены такие проектные решения, которые в совокупности исключают недопустимые воздействия на окружающую среду в процессе эксплуатации АСТ как при нормальных, так и при аварийных режимах, включая запроектные. На базе этих решений разработан проектный ряд АСТ в диапазоне единичной мощности 30–500 МВт.

Экономическая эффективность АСТ

Корректное сравнение экономических характеристик АСТ и традиционных котельных на органическом топливе требует учета всех затрат в цикле: добыча—транспортирование—переработка—сжигание—удаление отходов. Кроме того, должны быть учтены затраты на компенсацию экологического ущерба при использовании того или иного вида топлива. К сожалению, до настоящего времени такое представительное исследование отсутствует. Предлагаемые в проектах станции экономические расчеты в соответствии с действующими нормативами в значительной степени условны. Однако не вызывает сомнений следующий из них вывод, что, в отличие от АСТ, в котельных на органическом топливе определяющий вклад в стоимость вырабатываемой тепловой энергии вносит стоимость топлива.

Поскольку в будущем можно ожидать только увеличения стоимости органического топлива, то экономические преимущества АСТ будут не только сохраняться, но даже возрастать.

Вопросы контроля ресурсной надежности энергетических реакторов

К вопросу о создании эксплуатационного мониторинга ресурса оборудования и систем ядерных энергетических установок¹

Развивающиеся и накапливающиеся в течение длительного срока службы неконтролируемые деградиационные процессы могут привести к внезапным отказам, которые недопустимы для потенциально опасных объектов. Для предупреждения таких катастроф необходимо создание эксплуатационного мониторинга, основные принципы которого описаны в статье на примере ядерных энергетических установок.

Обоснование гарантируемой безопасности ядерных энергетических установок (ЯЭУ) в течение длительного срока службы (40–60 лет) при коэффициенте использования установленной мощности ~90 % требует достаточно надежной информации о характере и истории воздействий, которым подвергаются конструкционные материалы в процессе изготовления, монтажа и последующей эксплуатации конструктивных элементов, включая этапы утилизации. Значительная часть этих воздействий (нестационарное термомеханическое нагружение, радиационное воздействие, воздействие рабочих сред и т. д.) в течение всего срока службы оборудования и систем вызывает различного рода преобразования начальной структуры материала и деградиационные процессы, которые изменяют начальные физико-механические и прочностные характеристики конструкционных материалов. Информация об этих процессах при проектировании реакторной установки

¹ Журнал «Проблемы машиностроения и надежности машин», № 4, 2003, с. 105–117. Авторы: Митенков Ф.М., Коротких Ю.Г. Печатается с сокращениями

является неполной, и она должна уточняться и пополняться при изготовлении, монтаже и эксплуатации. В этом случае появляется возможность обоснования назначенного срока службы и обеспечения условий безопасной эксплуатации оборудования и систем ЯЭУ, решаются вопросы обоснования оптимальных межконтрольных интервалов в процессе эксплуатации. Последнее весьма важно для повышения конкурентоспособности атомной энергетики, учитывая повышенные значения удельных капитальных затрат по сравнению с традиционными энергетическими объектами. Решение этих задач на базе традиционных подходов практически затруднено сложным составом и структурой используемых конструкционных материалов, воздействием на структуру материалов технологических процессов при изготовлении и монтаже, малосерийностью атомных объектов, исключающих статистическую представительность результатов эксплуатации однотипного оборудования. Необходима целенаправленная разработка методологии обеспечения контроля темпов деградационных процессов в критических конструктивных узлах оборудования и систем на всех жизненных стадиях установок, начиная с проектирования.

Требования к надежности корпуса реактора и первому контуру в целом в течение всего срока службы должны быть исключительно жесткими, а их выполнение контролируемым на всех стадиях жизненного цикла. Обеспечение этих требований возможно только при условии надежного знания изменений физико-механических и прочностных характеристик конструкционных материалов в течение всего срока эксплуатации. Это возможно только при условии контроля темпов деградационных процессов индивидуально для каждого критического элемента в реальных эксплуатационных условиях. Длительный срок службы приводит к проявлению в разные периоды эксплуатации различных доминирующих механизмов деградации материала, инкубационные периоды которых протекают скрытно. Длительность этих периодов в значительной степени зависит от конкретных условий эксплуатации конструктивных элементов, определяемых фактической моделью эксплуатации, а поврежденность материала в течение инкубационного периода не может быть выявлена традиционными методами неразрушающего контроля состояния материала. Примером таких инкубационных периодов является фаза накопления рассеянных по объему материала повреждений по механизмам малоциклового и многоциклового усталости, предшествующая образованию усталостной трещины. В первые 20–30 лет срока службы конструктивных элементов доминирующим механизмом деградации является малоцикловая термическая усталость, а в последующие десятилетия – многоцикловая усталость ввиду большого инкубационного

периода этого механизма. Конкретное время проявления и взаимодействие этих механизмов зависит от конкретной истории эксплуатации установки.

Ввиду локальности деградационных процессов ресурс конструктивных элементов по существу определяется ресурсом их опасных зон с наибольшими темпами деградационных процессов, параметры которых могут сильно отличаться из-за различия конструктивных особенностей эксплуатационных условий, технологии изготовления и свойств конструкционных материалов. Трудность или невозможность доступа к контролируемым зонам конструктивных узлов в процессе эксплуатации затрудняет оценку фактического состояния материала этих зон неразрушающими методами контроля при очередных освидетельствованиях. Каждому режиму эксплуатации соответствуют свои опасные зоны конструктивных элементов с различными темпами деградации материала по определенным механизмам деградации (многоцикловая усталость, малоцикловая усталость, накопление повреждений от нестационарной ползучести, развитие существующего дефекта). Это обстоятельство обуславливает зависимость процессов накопления повреждений в каждой зоне конструктивного узла от фактической истории эксплуатации (фактической последовательности режимов модели эксплуатации).

Проблема контроля текущей поврежденности (выработанного ресурса) конструктивных узлов и прогноза ее развития до наступления предельного состояния (остаточного ресурса) должна решаться на базе эксплуатационного мониторинга ресурса оборудования и систем установки, назначением которого являются: осуществление контроля за выработанным и остаточным ресурсами оборудования и систем в процессе эксплуатации с учетом фактической истории эксплуатации, фактических свойств конструкционных материалов, отклонений от чертежно-технической документации при изготовлении, монтаже и выявлении дефектов; определение индивидуальных возможностей по долговечности элементов оборудования и систем, лимитирующих ресурс, обоснование длительности межконтрольных интервалов; оптимизация (при необходимости) эксплуатации в части снижения нагруженности конструктивных элементов; повышение безопасности эксплуатации установки за счет снижения степени вероятности возникновения внезапных отказов по условиям прочности (снижение степени вероятности возникновения скрытых деградационных отказов).

Развивающиеся в течение длительного срока службы постепенные неконтролируемые деградационные процессы могут привести к внезапным неконтролируемым отказам, которые недопустимы для

потенциально опасных объектов. Оценка текущего состояния материала в процессе эксплуатации обычно проводится различными методами неразрушающего контроля. Однако во многих случаях наиболее опасные зоны, определяющие ресурс оборудования и систем, являются недоступными для метода неразрушающего контроля. В этих условиях задачи оценки фактического технического состояния (выработанного ресурса) конструктивных элементов и прогноз их остаточного ресурса до предельных состояний решаются расчетными методами с использованием различных моделей деградационных процессов, развивающихся в процессе эксплуатации.

Для построения методов и моделей расчетной оценки выработанного и прогноза остаточного ресурса можно использовать следующие подходы.

В первом подходе модели строятся на основе наблюдений за данным объектом в начальные периоды его эксплуатации. В процессе наблюдений отбираются информативные параметры, устанавливаются системные связи между входными, определяемыми внешними воздействиями на объект, и выходными параметрами, которые рассматриваются как трансформация входных в результате воздействия объекта. Контроль за объектом в процессе эксплуатации заключается в сравнении наблюдаемых значений выходных параметров с вычисленными по модели. Тренд разности между замеренными и вычисленными параметрами является диагностическим параметром, характеризующим старение объекта. Этот подход применяется, когда отсутствуют необходимые количественные характеристики диагностируемых процессов, и разработка математической модели рассматриваемых физических процессов невозможна. Поэтому диагностируемый объект рассматривается как «черный ящик» и точность прогнозной модели зависит от информативности выбранных диагностических параметров, их чувствительности к изменению степени поврежденности материала и точности методов экстраполяции.

Второй подход основывается на анализе статистической информации о наработках до отказа аналогов данного конструктивного узла или его отдельных элементов (системная теория надежности). На основе обработки данной информации строится вероятностная прогнозная модель, вычисляются групповые точечные или интервальные оценки остаточного ресурса данного узла и вероятности его безотказной работы в течение заданной наработки (или вероятность отказа). Применение вероятностных методов для оценки выработанного ресурса уникальных систем и малосерийных объектов встречает существенные трудности, которые обусловлены следующими объективными причинами: отсутствием представительной статистической информации о наработках

на отказ для конструктивных элементов ввиду малосерийности и уникальности их условий эксплуатации; высокими требованиями к вероятности безотказной работы (менее 0,999) для потенциально опасных систем (при этом наступление предельного состояния элементов, работающих в штатных условиях, не может рассматриваться как массовое событие и вследствие этого возникает необходимость экстраполяции эмпирических распределений в область малых вероятностей); условным характером вычисляемых вероятностей безотказной работы или риска.

Третий подход основан на математическом моделировании действующих процессов деградации материала индивидуально для каждой зоны оборудования и систем, обусловленных фактическими условиями эксплуатации, с использованием методов и моделей механики поврежденной среды и механики разрушения.

Под механизмами деградации понимают процессы накопления повреждений в материале конструктивных узлов, развивающиеся на микро— и макроуровнях вследствие эксплуатационных силовых и тепловых нагрузок, воздействия внешней среды и физических полей различной природы. Накапливающиеся в процессе эксплуатации повреждения приводят к постепенному ухудшению физико-механических характеристик конструкционного материала — деградации начальных предельных состояний конструктивных узлов. Процесс накопления повреждений может развиваться по различным механизмам (многоцикловая, малоцикловая усталость, ползучесть, коррозия, радиационные повреждения и т.д.), протекающим в зависимости от эксплуатационных условий одновременно и последовательно. Методы, основанные на математическом моделировании физических процессов деградации материала в опасных зонах по фактической истории их нагруженности, позволяют проводить анализ и прогноз развития поврежденности в любой зоне объекта с учетом исходного состояния материала и конкретных условий эксплуатации в данной зоне. Точность метода сильно зависит от адекватности применяемых моделей фактическому процессу деградации материала и точности регистрации фактической истории эксплуатации объекта, которая определяет историю нагружения контролируемых зон. Наиболее перспективным является применение метода математического моделирования процессов поврежденности в сочетании с новыми нетрадиционными физическими методами контроля состояния материала на стадии накопления рассеянных по объему материала повреждений для коррекции теоретических оценок (спектрально-акустических, вдавливания инденторов и т. д.). Такое сочетание методов, оформленное в виде некоторой системы оценки выработанного и прогноза остаточного ресурса конструктивных узлов, позволит

решать задачи контролирования темпов деградиционных процессов. Большое количество факторов, влияющих на процессы исчерпания ресурса, обуславливают множество вероятных сценариев развития процессов деградации материала конструктивных узлов в зависимости от условий эксплуатации объекта. Поэтому получение достоверной оценки выработанного и прогноза остаточного ресурса оборудования и систем ЯЭУ представляет сложную научно-техническую задачу, которая решается на базе адекватного эксплуатационного мониторинга ресурса (ЭМР) оборудования и систем.

В обеспечение создания такой системы необходимо следующее.

1. На стадии проектирования: определяются критические элементы оборудования и систем, основные механизмы деградации конструкционных материалов опасных зон критических элементов; обосновываются назначенные сроки службы и ресурс оборудования и систем из условий прочности критических элементов в соответствии с требованиями нормативных документов с учетом результатов испытаний, результатов анализа расчетных моделей и анализа информации по результатам эксплуатации аналогов; определяются параметры процессов деформирования и деградации материала в опасных зонах в зависимости от режима модели эксплуатации.

2. На стадии изготовления и монтажа обеспечиваются: регистрация отклонений от чертежно-технической документации, фактических сертификатных данных конструкционных материалов критических элементов; контролирование качества изготовления и фактической начальной дефектности материала конструктивных узлов оборудования и систем; подтверждение назначенных сроков службы и ресурса оборудования и систем с учетом выявленных отклонений от чертежно-технической документации, фактических сертификатных данных конструкционных материалов, фактической начальной дефектности.

3. На стадии эксплуатации предусматриваются: регистрация фактической модели эксплуатации; расчетная оценка выработанного и прогноз остаточного ресурса контролируемых конструктивных элементов оборудования и систем установки по их фактической истории нагруженности, определяемой фактической историей эксплуатации; при необходимости оценка состояния материала доступных зон критических элементов (поврежденности, геометрии и топологии дефектов) неразрушающими методами контроля; оптимизация (при необходимости) модели эксплуатации в целях снижения нагруженности критических элементов оборудования и систем, по возможности без ограничения тактико-технических характеристик; решение задач продления назначенных сроков службы и ресурса оборудования, систем и установки в целом.

Создание системы эксплуатационного мониторинга ресурса включает технологический и рабочий этапы.

Технологический этап включает:

1. Разработку: математических моделей процессов деформирования, накопления повреждений и развития дефектов в конструкционных материалах оборудования и систем установки; расчетных кодов процессов деформирования, накопления повреждений, развития дефектов в конструктивных зонах оборудования и систем при нагружениях, соответствующих режимам модели эксплуатации установки; экспериментальных средств и методик для определения параметров моделей.

2. Верификацию расчетных кодов, аттестацию математических моделей и средств неразрушающего контроля.

3. Разработку экспериментального стенда для отработки методических вопросов реализации мониторинга, состоящего из конструктивных элементов трубопроводов с патрубками, сварными швами и начальными технологическими дефектами, моделирующими возможные дефекты критических зон оборудования; средств нагружения, имитирующих эксплуатационное нагружение конструктивных узлов оборудования и систем установки в результате циклического изменения давления, температурных изменений объема материала, перемещения оборудования; систем термо- и тензометрии; средств неразрушающего контроля состояния материала и развития начальных дефектов; системы регистрации изменения давления и температуры; базы данных.

4. Формирование баз данных технологической и рабочей компонент мониторинга (структура реакторной установки по критическим элементам, критическим узлам, зонам, характеристики конструкционных материалов, параметры моделей, для каждой критической зоны — параметры процессов деформирования, накопления повреждений, развития дефектов, параметры неразрушающих методов контроля, верификационные эксперименты).

Технологическая компонента должна обеспечивать: экспериментальное исследование процессов деформирования, накопления повреждений, развития дефектов в конструкционных материалах и сварных соединениях оборудования и систем при нагружениях, соответствующих режимам модели эксплуатации, определение параметров моделей деформирования, накопления повреждений, развития дефектов; верификацию расчетных кодов и моделей; аттестацию неразрушающих средств контроля состояния материала оборудования и систем; расчеты процессов деформирования, накопления повреждений, развития дефектов в конструкционных материалах оборудования

и систем в упругой и упругопластической постановках при термосило-вых нагрузжениях, соответствующих режимам модели эксплуатации; выбор критических конструктивных элементов и зон оборудования и систем установки; заполнение базы данных рабочей компоненты мониторинга информацией, необходимой для оценки выработанного и прогноза остаточного ресурса оборудования и систем по фактической модели эксплуатации; хранение и обработку информации в базе данных технологической компоненты, необходимой для реализации мониторинга; дополнительное обоснование назначенных сроков службы и ресурса оборудования и систем с учетом выявленных отклонений от чертежно-технической документации и начальной дефектности.

Рабочая компонента должна обеспечивать: регистрацию фактической истории эксплуатации (последовательность режимов модели эксплуатации, регистрацию их параметров, идентификацию нештатных режимов, регистрацию их параметров); определение фактического состояния материала доступных критических зон оборудования и систем (текущей поврежденности, топологии и геометрии дефектов, выработанного ресурса) неразрушающими методами контроля; при необходимости, уточнение нагруженности критических зон, корректировку модели эксплуатации; расчетную оценку выработанного ресурса критических узлов оборудования и систем по фактической модели ее эксплуатации; расчетную оценку остаточного ресурса от текущего до предельного состояния критических узлов по планируемой модели эксплуатации; сравнение прогнозов остаточного срока службы и ресурса с назначенными значениями и выдача рекомендаций по дальнейшей модели эксплуатации исследуемого оборудования и систем из условия обеспечения проектного ресурса и продления назначенных срока службы и ресурса; представление результатов в удобном для понимания оператором виде; хранение и обработку результатов оценки выработанного и прогноза остаточного ресурса конструктивных узлов, параметров их фактической нагруженности и фактической модели эксплуатации.

Экспериментальные средства для получения количественных характеристик процессов деформирования, накопления повреждений и развития дефектов должны дать возможность получить в рабочем диапазоне температур: стандартные характеристики конструкционных материалов; параметры петель гистерезиса упругопластического деформирования материала при симметричном жестком нагружении с различными амплитудами деформаций (одноосное растяжение-сжатие); параметры кривых усталости при симметричном жестком циклическом нагружении с различными амплитудами деформаций при постоянной температуре в диапазоне долговечностей 10^2 - 10^8 циклов; параметры трещиностойкости материалов; параметры моделей вязкоупругопластического деформирования материалов; параметры

моделей накопления усталостных повреждений; параметры моделей развития дефектов (роста усталостных трещин).

Средства неразрушающего контроля, основанные на современных нетрадиционных теоретико-экспериментальных физических методах оценки состояния материала (спектрально-акустических, регистрации диаграмм вдавливания, акустико-эмиссионных), должны обеспечивать определение текущей поврежденности материала на стадии накопления рассеянных повреждений и получать информацию о геометрии и топологии зародившихся дефектов.

Модели деформирования и накопления повреждений конструктивных материалов должны моделировать (погрешность не более 10 %) процессы неизотермического вязкоупругопластического деформирования материала и накопления усталостных повреждений при нестационарных нерегулярных термомеханических нагружениях, соответствующих режимам модели эксплуатации реакторной установки. С той же погрешностью модели развития дефектов должны моделировать процессы развития трещин в материале конструктивных элементов при нерегулярных термомеханических нагружениях.

Расчетные коды должны обеспечивать (с погрешностью не более 10 %) расчеты кинетики напряженно-деформированного состояния при упругопластическом деформировании материала, развитие усталостных повреждений и дефектов типа усталостных трещин в материале конструктивных узлов оборудования и систем в двумерной и трехмерной постановках в условиях нестационарного термомеханического нагружения, соответствующих режимам модели эксплуатации.

Система регистрации фактической истории эксплуатации должна обеспечивать регистрацию фактической истории эксплуатации (последовательность режимов модели эксплуатации, регистрацию их параметров, идентификацию нештатных режимов, регистрацию их параметров). Методические и программные средства рабочей компоненты эксплуатационного мониторинга ресурса должны обеспечивать индивидуально для каждой контролируемой зоны оценку выработанного ресурса по фактической истории ее нагруженности и оценку остаточного ресурса по планируемой модели эксплуатации.

База данных технологической компоненты мониторинга предназначена для хранения информации: общей структуры установки, состава критических конструктивных элементов, критических контролируемых зон; параметров отступлений от чертежно-технической документации критических элементов, начальной поврежденности контролируемых зон; состава конструктивных материалов, их физико-механических характеристик, параметров моделей деформирования, накопления повреждений, развития дефектов; параметров

режимов модели эксплуатации реакторной установки; параметров процессов деформирования, накопления повреждений, развития дефектов для каждой контролируемой зоны в зависимости от режима модели эксплуатации; параметров предельных состояний для каждого критического узла; параметров неразрушающих методов контроля и результатов обучающих экспериментов; экспериментальных результатов верификации расчетных кодов, моделей деформирования, накопления повреждений, развития дефектов.

База данных рабочей компоненты эксплуатационного мониторинга ресурса должна содержать информацию, отражающую: структуру установки, состав критических конструктивных элементов, контролируемых зон; фактическую модель эксплуатации на текущий момент (последовательности режимов модели эксплуатации, их параметры); текущую поврежденность контролируемых зон (выработанный ресурс материала); параметры процессов деформирования, накопления повреждений, развития дефектов для каждой контролируемой зоны и их связь с режимами модели эксплуатации; параметры предельных состояний для каждой контролируемой зоны и контролируемого конструктивного узла.

Для моделирования процессов неизотермического упругопластического деформирования конструкционных материалов опасных зон конструктивных элементов при нестационарных термосиловых нагрузениях, соответствующих режимам модели эксплуатации, используется модель термопластичности с нелинейным кинематическим и изотропным упрочнением. Она позволяет с необходимой степенью точности описывать монотонное и циклическое упрочнение материала при пропорциональном, непропорциональном (вращение главных площадок), нестационарном и нерегулярном термомеханическом нагружении, а также локальную анизотропию упрочнения при пластическом деформировании материала. Она позволяет получать параметры, необходимые для моделирования процессов накопления усталостных повреждений – работу напряжений и микронапряжений на пластических деформациях. Эта модель обобщает используемые в настоящее время в вычислительных кодах типа *ANSYS* более простые модели и включает их как частный случай.

Математическое моделирование реальных процессов деградации материала для каждой контролируемой зоны по фактической истории ее нагруженности (малоцикловая, многоцикловая усталость) осуществляется с помощью методов и моделей механики поврежденной среды и механики разрушения.

Процесс накопления рассеянных повреждений происходит в две стадии: зарождение и рост дефекта и их коллективное взаимодействие путем слияния в микротрещины. В пределах указанных стадий

до образования макроскопической трещины ~ 1 мм элементарный объем тела можно рассматривать как сплошную среду, в объеме которой статистически распределены структурные элементы и различного рода дефекты. Проведенные теоретические и экспериментальные исследования, структурно-энергетическая интерпретация процессов деформирования и разрушения выявили глубокую взаимосвязь между закономерностями необратимой деформации, повреждаемостью и разрушением твердых тел с энергетическими характеристиками процессов. Однако для использования этой связи при моделировании процессов повреждений необходимо устанавливать функциональные зависимости между основными энергетическими характеристиками и параметрами процессов (скоростью накопления повреждений единице объема, плотностью энергии, скоростью изменения напряжений, пластических деформаций, температуры и т. д.). С учетом этого прогнозные модели процессов накопления усталостных повреждений (малоцикловая усталость, многоцикловая усталость или их сочетание) надо строить на базе следующих положений: рассматривается стадия накопления рассеянных по объему материала микроповреждений до образования макроскопической трещины ~ 1 мм; рассматриваются стадия зарождения и роста микродефектов и стадия развития поврежденности путем развития и слияния макроскопических трещин до образования макроскопической трещины (развитие поврежденности на второй стадии приводит к прогрессирующему ухудшению физико-механических характеристик материала); для процессов деформирования и накопления повреждений задачи рассматриваются как связанные (механика поврежденной среды); эволюционные уравнения процессов вязкопластического деформирования и накопления повреждений учитывают влияние температуры, многоосности и параметров напряженно-деформированного состояния на темпы накопления повреждений.

Такой подход позволяет проводить анализ развития поврежденности в любой зоне конструктивного узла в зависимости от исходного состояния материала и конкретных параметров нагруженности этой зоны. Точность прогноза зависит от адекватности применяемых моделей реальному процессу деградации материала и соответствия моделируемого режима нагружения в данной зоне фактическим условиям эксплуатации, для чего необходима предварительная верификация модели на стенде.

Метод требует периодической коррекции теоретических оценок ресурса материала в контролируемых зонах с помощью средств неразрушающего контроля при ремонтах или продлении назначенных сроков службы или ресурса.

Проблемы обеспечения надежности, ресурса и безопасности ядерных энергетических установок¹

Изложены методология контроля выработанного и прогноза остаточного ресурса оборудования и систем ядерных энергетических установок и их эксплуатационного мониторинга ресурса.

Ядерная энергетическая установка (ЯЭУ) представляет собой потенциально опасную систему повышенной сложности. Гарантированная безопасность таких систем должна обеспечиваться за счет целенаправленных схемных, конструктивных, методологических, организационных и других решений, исключающих реализацию неконтролируемой ядерной реакции деления и разгерметизацию систем первого контура, включающего реактор и другое оборудование, обеспечивающее теплоотвод от активной зоны реактора. Очевидно, что требования к надежности и ресурсу корпуса реактора и первому контуру в целом должны быть исключительно жесткими, а их выполнение контролируемым на всех стадиях жизненного цикла объекта: проектирование, изготовление, монтаж и эксплуатация. Обеспечение надежной эксплуатации оборудования и систем ЯЭУ при возрастающих требованиях к безопасности и сроку службы практически невозможно только на основе традиционного регламентного обслуживания, базирующегося на заложенных при проектировании коэффициентах запаса и среднестатистических данных о наработках на отказ. Это обусловлено большой дисперсией оценок наработок оборудования до отказа и ресурсных характеристик конструкционных материалов. В связи с этим весьма актуальной становится задача разработки методологии оперативного контроля выработанного ресурса определяющих конструктивных элементов в процессе эксплуатации и надежного прогноза (оценки) остаточного ресурса до наступления предельного состояния. Реализация этой методологии (эксплуатационный мониторинг ресурса) позволит более полно использовать ресурсные возможности оборудования, предотвратить аварийные ситуации,

¹ Журнал «Проблемы машиностроения и надежности машин», № 2, 2002, с. 106–112. Авторы: Ф.М. Митенков, Г.Ф. Городов, Ю.Г. Коротких, В.А. Панов, С.Н. Пичков

связанные с потерей работоспособности отдельного оборудования, и тем самым существенно улучшить экономические показатели и надежность ЯЭУ в целом.

Длительный срок службы вновь проектируемых ЯЭУ (50–60 лет) приводит к проявлению в течение эксплуатации различных механизмов деградации материала. Механизмы деградации, имеющие большой инкубационный период, проявляются только на заключительной стадии эксплуатации. Значительная часть этих процессов происходит скрытно, и поврежденное состояние конструктивного узла не может быть выявлено традиционными методами неразрушающего контроля. Примером такого инкубационного периода деградации является фаза усталостного повреждения до возникновения обнаруживаемой трещины – фаза накопления усталостных рассеянных повреждений. Особенностью ЯЭУ является трудность и даже невозможность доступа к определяющим ресурс установки узлам в процессе эксплуатации. В связи с этим контролирование темпов деградации материала в этих зонах можно проводить только моделированием указанных процессов математическими методами.

Эксплуатационные условия работы конструктивных узлов реакторной установки характеризуются многопараметрическими нестационарными термосиловыми воздействиями, состоящими из отдельных блоков нагружения, соответствующих определенным режимам эксплуатации установки. Каждый блок нагружения характеризуется своими законами изменения термосиловой нагрузки, определяющими опасные зоны конструктивных узлов и доминирующий процесс деградации материала (процесс накопления повреждений) в этих зонах (многоцикловая усталость, малоцикловая усталость, коррозия под напряжением и т. д.). Эти процессы могут проявляться в зависимости от условий эксплуатации либо последовательно, либо одновременно, обуславливая зависимость темпов деградационных процессов в каждой зоне от фактической истории эксплуатации установки. При отсутствии контроля постепенное накопление повреждений в опасных зонах конструктивных элементов создает впечатление внезапных отказов. Процессы накопления; повреждений предшествуют зарождению трещины и вызывают прогрессирующее ухудшение прочностных характеристик и охрупчивание материала. Общий процесс разрушения включает три основных стадии: зарождение и развитие микродефектов, их слияние в микроскопические трещины до образования макроскопической трещины определенного размера (~1 мм), развитие макроскопической трещины до критического размера.

Наличие дефектов в материале, имевших место при изготовлении или развившихся в процессе эксплуатации, ставит проблему контроля

за темпом деградационных процессов, за накопленную поврежденность и остаточную прочность конструктивного узла, т.е. проблему эксплуатационного мониторинга ресурса (ЭМР) в целях безопасной эксплуатации реакторной установки и назначения, при необходимости, межконтрольных интервалов для оценки состояния материала неразрушающими методами контроля.

ЭМР позволяет реализовать эксплуатацию оборудования и систем установки по их фактическому состоянию путем решения двух основных задач: надежная оценка текущей поврежденности материала контролируемых зон неразрушающими методами контроля, а также путем моделирования процессов развития поврежденности (выработанного ресурса) по фактической истории эксплуатации реакторной установки; прогноз развития текущей поврежденности в каждой опасной зоне (остаточного ресурса) на базе различных прогнозных моделей до наступления предельного состояния для прогнозируемых условий эксплуатации реакторной установки.

Ввиду локальности деградационных процессов ресурс конструктивных узлов реакторной установки по существу означает ресурс их опасных зон с наибольшими темпами деградационных процессов, которые могут сильно различаться из-за различия конструктивных особенностей, эксплуатационных условий, технологии изготовления, свойств материалов и т. д.

Основные проблемы ЭМР заключаются в разработке методов, теоретических моделей, алгоритмов и пакетов программ моделирования процессов деформирования, накопления повреждений по различным физическим механизмам и развития трещиноподобных дефектов для реальных эксплуатационных условий (уравнения и методы решения краевых задач механики поврежденной среды, механика разрушения, методы и алгоритмы оценки выработанного и прогноза остаточного ресурса материала опасных зон, критерий предельных состояний); создании высокочувствительных средств неразрушающего контроля поврежденности материала опасных зон как на стадии рассеянных повреждений, так и на стадии развития макроскопических дефектов; создании средств автоматической регистрации параметров фактической истории эксплуатации оборудования и систем реакторной установки. Эффективное решение этих проблем определяется совокупностью принципов, методов и средств оценки поврежденности материала (определение степени поврежденности материала, топологии и геометрии макроскопических дефектов) конструктивных узлов в процессе изготовления, монтажа и эксплуатации, точности знаний истинных условий нагруженности контролируемых зон и адекватности прогнозных моделей развития

деградационных процессов для каждой контролируемой зоны физическим процессам накопления повреждений в этой зоне.

Для надежной оценки состояния материала контролируемых зон не только на стадии развивающихся макроскопических дефектов, но и на предшествующей ей стадии накопления рассеянных повреждений в материале, занимающей значительную долю долговечности, необходимо привлечение современных нетрадиционных средств неразрушающего контроля (спектрально-акустических систем, непрерывной регистрации диаграмм вдавливания, акустико-эмиссионных и т. д.). Для выявления топологии и геометрии глубинных и поверхностных дефектов наряду с традиционными, необходимо применение инструментальных средств, использующих акустическую голографию, а для контроля параметров растущих дефектов – акустико-эмиссионный контроль.

При построении прогнозных моделей оценки остаточного ресурса можно использовать следующие подходы. Согласно первому подходу, на основе обработки имеющейся информации строится вероятностная прогнозная модель и вычисляются групповые, точечные или интервальные оценки остаточного ресурса данного элемента и вероятности его безотказной работы за заданную наработку. Во втором подходе прогнозные модели строятся на основе наблюдений за данным объектом или его прототипом в процессе эксплуатации. Контроль за объектом заключается в сравнении наблюдаемых значений выходных параметров с вычисленными по представительной модели, когда в качестве аргументов закладываются текущие значения входных параметров. Тренд разности между замеренными и вычисленными значениями параметров является диагностическим параметром, характеризующим старение объекта.

В последнее время для ряда ответственных инженерных объектов (ЯЭУ, летательные аппараты) сформулированы и отражены в официальных нормативных документах требования по уровню безопасности из условий прочности основных несущих конструкций в прямой вероятностной форме. Приемлемые значения вероятностей безотказной работы таких объектов близки к единице, что требует экстраполяции результатов в область редких событий, которая недостаточно надежна. Кроме того, для таких уникальных объектов, как правило, отсутствует представительный статистический материал. Проведенные исследования и опыт фактической эксплуатации самолетов показал, что традиционно требуемые детерминированные условия в основном эквивалентны жестким прямым вероятностным критериям.

Третий подход основан на математическом моделировании реальных процессов деградации материала в контролируемых зонах

элементов по различным физическим механизмам (малоцикловая, многоцикловая усталость, нестационарная ползучесть, коррозия, развитие трещин и т.д.) с помощью методов и моделей механики поврежденной среды и механики разрушения. Для этого необходимо ввести в уравнения механики макропеременные, интегрально отражающие процессы деградации материала на мезоуровне (в объеме зерна); ввести для каждого механизма деградации «внутреннее время» процесса, в котором должна измеряться наработка материала по этому механизму; ввести для каждого механизма деградации соответствующие меры поврежденности, отражающие физическую сущность данного процесса; разработать для эксплуатационных условий адекватную математическую модель связанных процессов деформирования и деградации материала; установить принципы эквивалентности деградационных процессов для различных условий деформирования материала (многоосности, вида напряженного состояния, вида траектории деформирования, температуры и т. д.); установить принципы суммирования повреждений при изменении параметров режимов нагружения от различных деградационных процессов; выявить основные факторы, влияющие на процессы деградации материала, и установить количественные зависимости темпов деградации от этих факторов; установить связь параметров реального физического процесса деградации материала с параметрами математической модели данного процесса и параметрами методов неразрушающего контроля состояния материала.

Мерой текущей поврежденности контролируемой зоны является отношение текущего объема микродефектов (микропор, микротрещин) к критическому для процесса накопления повреждений, рассеянных по объему материала, или отношение текущего характерного параметра растущего дефекта (длины трещины) к критическому.

Формулировка прогнозной математической модели процессов накопления усталостных повреждений (малоцикловая усталость, многоцикловая усталость) строится, исходя из следующих положений: рассматривается стадия накопления рассеянных по объему материала микроповреждений до образования макроскопической трещины ~ 1 мм; рассматриваются две стадии развития рассеянных микроповреждений: стадия рождения и роста микродефектов и стадия развития поврежденности путем развития и слияния микроскопических трещин до образования макроскопической трещины; развитие поврежденности на второй стадии приводит к прогрессирующему ухудшению физико-механических характеристик материала); для процессов деформирования накопления повреждений задачи рассматриваются как связанные (механика поврежденной

среды); эволюционные уравнения процессов вязкопластического деформирования и накопления повреждений учитывают влияние температуры, параметров напряженно-деформированного состояния на темпы накопления повреждений.

Для процесса накопления усталостных повреждений (многоцикловая усталость, малоцикловая усталость) строится своя прогнозная модель.

Такой подход позволяет проводить анализ развития поврежденности в любой зоне конструктивного узла в зависимости от исходного состояния материала и конкретных параметров нагружения этой зоны. Длительность межконтрольных интервалов для каждого узла определяется на базе расчетов по прогнозным моделям остаточного ресурса до наступления предельного состояния этого узла.

ЭМР реализуется выполнением следующих основных этапов. На первом этапе (технологическом) проводится анализ объекта: (структура, условия эксплуатации, материалы, технология изготовления, требуемый ресурс, начальная дефектность и ее контроль, уровни допускаемых напряжений, коэффициенты запаса и т. д.). Цель этапа – максимальный учет основных факторов физических воздействий на конструктивные элементы, получение информации о параметрах фактической модели эксплуатации элементов реакторной установки, выбор доминирующих механизмов деградации материала, проведение экспериментальных исследований закономерностей их развития в конкретных условиях эксплуатации, построение математических моделей данных процессов и определение их материальных параметров, построение прогнозных моделей расчета остаточного ресурса для доминирующих механизмов по фактической истории эксплуатации установки (нагруженности контролируемых зон). Путем проведения соответствующих натурных и численных экспериментов проводится верификация или адаптация к конкретным условиям разработанных моделей механики поврежденной среды, развития трещин, прогнозных моделей оценки остаточного ресурса, обучение выбранных методов неразрушающего контроля состояния материала. Модель эксплуатации реакторной установки представляется и виде произвольной последовательности стандартных режимов нагружения. С использованием соответствующих вычислительных кодов, разработанных моделей механики поврежденной среды и механики разрушения для каждого режима модели эксплуатации и ответственных элементов установки проводятся расчеты процессов тепломассопереноса, кинетики напряженно-деформированного состояния (НДС), процессов накопления повреждений, развития начальных дефектов, если таковые имеют место, или предполагаемых дефектов с параметрами,

определяемыми выбранными методами контроля дефектности материала конструктивных узлов при изготовлении и монтаже. На основании расчетов выбираются контролируемые зоны с наибольшими темпами деградации материала, ресурс которых определяет назначенный срок службы элементов реакторной установки (проектный ресурс с учетом нормативных коэффициентов запаса). Для каждой контролируемой зоны определяются параметры нагруженности и процессов накопления повреждений или развития дефектов, соответствующих каждому режиму нагружения модели эксплуатации. Формируются соответствующие базы данных технологической и рабочей компоненты ЭМР. Полученная информация используется для обоснования назначенного срока службы отдельных элементов и реакторной установки в целом. Разработанные прогнозные модели, адаптированные к каждой контролируемой зоне, с соответствующими базами данных и пакетами прикладных программ, реализующих оценку выработанного ресурса по фактической истории нагруженности каждой зоны, используются в рабочей компоненте ЭМР, устанавливаемой непосредственно на объекте. Разработанные алгоритмы можно использовать для анализа живучести реакторной установки при развитии гипотетических аварий по различным сценариям, обоснования или оптимизации с точки зрения ресурса конструктивных решений.

На втором этапе реализации ЭМР, соответствующем изготовлению, монтажу и начальной стадии эксплуатации установки, проводится анализ отклонений от принятых проектных решений, выявленных при контроле дефектов, уточняются контролируемые зоны и физико-механические характеристики конструкционных материалов. На базе тензо- и термометрирования уточняются параметры фактической нагруженности контролируемых зон. На основании уточненных расчетов и прогнозируемой модели эксплуатации реакторной установки проводится дополнительное обоснование назначенного срока службы элементов установки, уточняются базы установки: регистрация перечня имевших место с начала эксплуатации до момента контроля штатных режимов нагружения, их характеристик, последовательности, идентификации нештатных режимов эксплуатации и регистрация их параметров.

На третьем этапе реализации ЭМР, соответствующем процессу эксплуатации, осуществляется регистрация фактической истории эксплуатации реакторной установки. По заданной последовательности прохождения режимов модели эксплуатации в каждой контролируемой зоне на базе прогнозной модели развития поврежденности проводится расчет текущей поврежденности материала или развития

имеющегося макроскопического дефекта (выработанного ресурса). Для заданных прогнозных моделей эксплуатации оценивается остаточная наработка до достижения в этой зоне предельного состояния (снижения остаточной прочности до критического значения). На базе этих оценок либо назначается срок контроля состояния материала в контролируемой зоне неразрушающими методами контроля для коррекции расчетных оценок выработанного и остаточного ресурса, либо для заданного срока службы выбирается надлежащая модель эксплуатации установки, при которой реализуются темпы накопления повреждений, не приводящие на заданном временном интервале к достижению предельного состояния. Таким образом, реализуется эксплуатация оборудования и систем реакторной установки по фактическому техническому состоянию. Реализация данной методики для системы компенсации давления реакторной установки атомного ледокола «Арктика» позволила создать методическую и критериальную базу для анализа и прогнозирования остаточного ресурса систем компенсации давления и проанализировать влияние конструктивных и схемно-режимных решений. На этой базе выполнены комплексные исследования ресурсных характеристик при накоплении усталостных повреждений в элементах системы компенсации давления и влияния конструктивных и схемно-режимных решений на темпы накопления усталостных повреждений, включая развитие трещины. Были разработаны конструктивно-технологические решения: применение тепловых экранов, трассировка трубопроводов с минимальным использованием горизонтальных участков, использование температурных демпферов при перетечках теплоносителя и т. д. Реализация данных мероприятий позволила повысить ресурс элементов системы компенсации давления реакторной установки до 142 тыс. часов при проектном ресурсе 100 тыс. часов. Предложенная методология ЭМР применима к другим ответственным объектам различного назначения.

СООБРАЖЕНИЯ, НАВЕЯННЫЕ ПЕРЕСТРОЙКОЙ

О роли высшей школы в развитии экономики страны¹

За последние 30 лет развитие получили исследования на стыке различных наук, то есть на междисциплинарной основе. При этом методологические достижения естественных наук, базирующихся, как известно, на использовании математики как основного средства стали энергично и успешно внедряться в гуманитарные области, а граница между «физиками» и «лириками» становилась все более нечеткой и размытой. Появились такие направления как «математическая экономика», «математическая психология». Характерны названия новых теорий в психологии: «алгебра совести», «геометрия субъективных пространств», «анализ целесообразного поведения с помощью конечных автоматов», «теория риска» и др.

Эти названия отражают и тот факт, что речь идет не просто о прямом заимствовании математических методов, а о становлении специальной математики.

Сейчас всерьез обсуждается вопрос о рождении нового научного направления — теоретической истории.

В свете сказанного выше нельзя не отметить рождение новой науки — синергетики, основой которой является так называемая нелинейная динамика. Становление этой науки связано с работами Э. Лоренца, И. Пригожина, Хакена. Нелинейная динамика внесла качественно новые представления в проблему прогноза.

Ранее полагали, что есть два класса объектов: детерминированные и стохастические. Поведение первых прогнозируется на любое время (описывается уравнениями механики), вторыми занимается теория вероятностей. Однако оказалось, что есть еще один класс объектов, формально детерминированных, однако прогнозирование их поведения возможно только в течение ограниченного времени.

¹ Сообщение на конференции в НГТУ, 2000–2001 гг.

Типичная задача Э.Лоренца, положившая начало новому направлению в естествознании, — исследование хаоса в детерминированных системах (три обыкновенных дифференциальных уравнения, ограниченная точность знания начальных условий, странный аттрактор). Странный аттрактор — математический образ детерминированных непериодических процессов.

Математизация гуманитарных и социальных сфер жизни общества позволяет ставить задачи и получать их решения, которые представляют не только научный, но и практический интерес (см. превосходную книгу «Синергетика и прогнозы будущего» авторов С.П.Капицы, С.П.Курдюмова, Г.Г.Малинецкого. М.: Наука, 1997).

Для России в настоящее время исключительный интерес и значение имели бы исследования в экономической области. Однако для этого необходим соответствующий уровень понимания значимости науки и образования руководством страны. А там ведь раздаются порой удивительные высказывания. Вспомните неоднократные заявления Е.Гайдара о «серой науке», которая «нам не по карману», и о том, что с высокими технологиями «можно подождать до следующего тысячелетия», а также слова А.Н. Шохина «С поддержкой науки надо несколько лет подождать».

Чрезвычайно важно уяснить, что наука и высшее образование являются теми сферами деятельности общества, к которым неправомочно использование понятий: «поддержка», «помощь». Современное общество должно опираться на науку, и только такое общество может рассчитывать на развитие и будущее. (Это поняли в Западной Германии — Л. Эрхард, отец «германского чуда», его книга «Благоденствие для всех»; в Японии и др.).

Поэтому судьбу высшего образования в России можно рассматривать только в непосредственной связи с развитием или деградацией экономики в России. Авторы названной выше книги (С.П. Капица и др.) для исследования проблемы высшего образования в стране разработали и исследовали простейшую математическую модель, ограничившись тремя переменными:

- объем производства;
- объем доступных материальных ресурсов;
- объем интеллектуальных ресурсов, включающий созданные или освоенные технологии, уровень образования, НИР и ОКР (почти совпадает с понятием «человеческий капитал»).

В модели есть два важных параметра:

- параметр « e » показывает, насколько велика доля национального продукта, идущая на образование и науку;

— параметр « σ » учитывает, насколько экономика и общество восприимчивы к результатам изысканий и новшеств в сфере технологий.

Вариантные исследования дали весьма информативные результаты.

Вариант 1. Страна — большая территория и богатые ресурсы, как невозполнимые, так и восполнимые. Происходит индустриализация. В течение первых 30 лет идет быстрый рост производства, оно возрастает в 50 раз.

Интеллектуальная сфера неплохо финансируется и вырастает в 30 раз. Однако восприимчивость экономики низка ($\sigma = 0$). Открытия и новые технологии слабо внедряются. Поэтому рост производства сопровождается быстрым исчерпанием природных ресурсов, поэтому через 32–35 лет производство катастрофически падает (в 5 раз) и стабилизируется на уровне, отвечающем потреблению возобновляемых ресурсов.

(Результаты совпали с экспертными исследованиями Всемирного банка реконструкции и развития для России).

Вариант 2. Параметр инноваций увеличен до $\sigma=1,5$. При этом производство падает на 30 %, затем быстро восстанавливается и устойчиво растет за счет наукоемких производств и интеллектуальной сферы. При этом важнейшим ресурсом становится теоретический потенциал элиты общества. Высшая школа в случае успешного развития государства дает возможность переходить от одних ресурсов к другим, от производства машин к производству идей.

Вариант 3. При условиях *варианта 2* финансирование интеллектуальной сферы урезано вдвое ($e=0,005$). Результат — к критическому моменту начала спада производства развитие интеллектуальной сферы не достигло необходимого уровня и не смогло оказать заметного влияния на развитие общества.

Вариант 4. Здесь усвоение недостаточно ($\sigma=1$). При том же уровне образования, как и в варианте 1, происходит выход на уровень возобновляемых ресурсов. Однако увеличение финансирования интеллектуальной сферы с 1 % до 1,5 % приводит к быстрому росту объема производства.

Приведенные результаты исследований могут, однако, вызвать вопрос: в какой мере обоснованно можно на них практически ориентироваться, не являются ли они сплошной идеализацией?

В качестве косвенного обоснования можно привести 2 примера:

а) В 50-х годах на Тайване начала реализовываться программа развития высшего образования. Уже в 60-х годах число студентов на душу населения превышало аналогичный показатель в Великобритании. Результат: несмотря на бедность ресурсов, Тайвань в 80-х годах

вошел в число «тихоокеанских тигров». Валовой национальный продукт Тайваня превышает четверть этого показателя Китая (соотношение населения по численности 12:1). Важно понять, что вложения в образование являлись не следствием, а одной из важных предпосылок успеха.

б) Программа повышения интеллектуального и технологического потенциала Японии в 70-х гг. В конце 60-х годов эксперты Японии утверждали: «Чтобы Япония сохранила высокие темпы роста, должна быть создана система технического образования, предусматривающая воспитание творческих способностей взамен воспитания способностей воспринимать или копировать технические достижения других стран».

В 1975 г. в «Основах социально-демократического плана» подчеркивалась необходимость «решительного перераспределения ресурсов на науку и технику, образование и культуру с тем, чтобы стало возможным максимальное проявление свободной творческой инициативы людей». Поставлена задача к 1980 г. подготовить 500 тыс. специалистов по ЭВМ. Последствия такой политики известны.

Предложения для включения в отраслевой документ «Некоторые аспекты облика атомной науки в XXI веке»

1. Освоение экономически перспективных регионов северных и северо-восточных регионов России невозможно без мощных атомных ледоколов, эффективное использование которых подтверждено многолетней эксплуатацией. Однако имеющиеся в России атомные ледоколы либо исчерпали назначенный ресурс, либо близки к его исчерпанию, несмотря на имеющуюся практику продления ресурса сверх проектного (назначенного). Министром транспорта С.О. Франком и Министром по атомной энергии Е.О. Адамовым в 1999 г. было принято решение о необходимости проектирования и строительства атомных ледоколов двух типов (исх. УАФ-140-409 от 12.03.1999). Поэтому необходимо в обсуждаемом «Документе...» предусмотреть задачу по обоснованию основных параметров и принципиальных проектных решений новой судовой ЯЭУ для использования на вновь проектируемых ледоколах. С этой целью потребуется разработка и соответствующее обоснование перспективных технических требований, включая мощность, энергоресурс, надежность, безопасность и др., с учетом специфических условий эксплуатации.

Их реализация требует: поиска оптимальных проектных и конструкторских решений; соответствующих исследований с учетом

накопленного опыта при эксплуатации судовой (корабельной) энергетики и последних достижений атомной энергетики в целом.

2. Экономическое освоение автономных регионов страны, не имеющих энергосетей, железнодорожной связи и постоянного, устойчивого автомобильного сообщения, невозможно без надежного энергообеспечения. Обеспечение таких регионов углеводородным топливом организационно сложно и, в конечном итоге, весьма дорого.

Поэтому для таких регионов создание малых атомных энергетических станций, обеспечивающих выработку электроэнергии и коммунальной тепловой энергии, является весьма актуальной задачей. Большой интерес такие станции могут представлять и для развивающихся стран. Современные достижения в атомной энергетике не исключают создания атомной энергетической станции малой мощности (энергоблок мощностью 25–100 МВт(э)), конкурентоспособной с соответствующими станциями на органическом топливе при прочих равных условиях. Поэтому малой атомной энергетике постоянное внимание уделяет МАГАТЭ. Поскольку создание таких атомных станций требует поиска новых нетрадиционных решений с учетом всех специфических особенностей таких станций и условий их размещения, необходимым этапом являются соответствующие научно-технические исследования. Поэтому указанная задача должна быть включена в отраслевой «Документ».

Следует иметь в виду, что программа работ Министерства энергетики США предусматривает разработку концепции малой атомной энергетики в течение ближайших трех лет.

3. Установки с реакторами типа ВВЭР на ближайшие несколько десятилетий будут преобладать в атомной энергетике. Это обусловлено накопленным опытом создания и эксплуатации АЭС с реактором этого типа, достигнутой ресурсной надежностью и подтвержденной безопасностью. Слабым местом этих станций является относительно низкий термодинамический КПД (30–33 %) по сравнению с современными парогазовыми установками, для которых КПД превышает 50 %. Поэтому экономическое совершенствование АЭС сейчас достигается, в основном, за счет увеличения мощности реактора, выгорания топлива, повышения КИУМ.

Однако возможность повышения термодинамического КПД не исключается для реакторов, использующих воду в качестве теплоносителя и замедлителя. Такая возможность появляется с переводом воды в реакторе на закритические параметры (давление, температура). По имеющейся информации, которой поделился профессор А.Л. Кириллов (ФЭИ), в США, Японии и Европе этой проблеме в настоящее время уделяется серьезное внимание. В Советском Союзе

были проведены работы по созданию электростанций на закритических параметрах, и значительное число таких станций успешно прошли стадию промышленной эксплуатации. Поэтому можно считать, что паротурбинная часть станции на закритических параметрах не является для России новой проблемой. Применительно к АЭС новым является создание реакторной установки на закритических параметрах.

Учитывая громадный технико-экономический выигрыш в случае отработки и обоснования решений по созданию реактора на закритических параметрах, считаю необходимым включить в план научно-технических работ Министерства работу по исследованию проблемы создания атомного энергоблока на закритических параметрах. При этом в целях исключения из состава энергоблока парогенератора, который во всех АЭС относится к критическому виду оборудования, целесообразно ориентироваться на одноконтурную реакторную установку.

Следует также иметь в виду, что на закритических параметрах воды возможно, в принципе, создание как теплового, так и быстрого реактора. Выбор должен определить сравнительный технико-экономический анализ.

Информация должна доходить до адресата*

По-видимому, неслучайно здесь прозвучало уже несколько выступлений фактически на одну тему: что нужно сделать, чтобы Россия вышла из того безусловно кризисного состояния, в котором она находится. Мне представляется, что Академия уделяет в своей деятельности большое внимание этому вопросу. Не только экономисты, но и достаточно много «управленцев», специалистов по исследованию динамики сложных систем, систем управления, систематизации и т. д. в последние годы тоже переключились на эту, вообще говоря, весьма непростую тему. Их усилиями проведены оригинальные исследования с полезными практическими, не отвлеченнотеоретическими выводами, которыми и должны были руководствоваться практики.

Думается, однако, что о таких результатах, да и о более крупных научных достижениях, широкая общественность имеет слабое представление. Посмотрите телевидение, послушайте радио. Там непрерывно спорят разные политики, по серьезным вопросам высказывают порой глупые мысли, часто противоречащие друг другу. Но не слышно мнения научных деятелей, Академии наук, авторитет которых в обществе

* Статья в «Вестнике Российской Академии наук», 2003 г.

до сих пор очень высок. Важно, чтобы результаты деятельности Академии находили отражение не только в решениях, принимаемых на высоком уровне. Нужно, чтобы компетентные рассуждения ученых распространялись в средствах массовой информации, чтобы в поисках ответов на трудные вопросы нашего времени учитывались взгляды профессионалов в своей области.

В то же время я глубоко убежден, что Академия уже много сделала и еще больше сделает для создания обоснованной программы стратегии развития. Подобные материалы нужно направлять не только в Правительство, комиссии, но и для широкого обсуждения. Например, сейчас принципиальным вопросом является деление всей системы электроснабжения, создание всяких промежуточных звеньев и пр. Что это, с точки зрения потребителя, — оптимизация, или наоборот, регресс?

Здесь как раз системное исследование может дать однозначный ответ: при каких условиях это благо, а при каких — вред. И если бы такая оценка прозвучала со стороны представителей РАН, она имела бы весомое значение. По существу Академия имеет возможность консолидировать в здравом направлении широкую общественность по многим вопросам. Это такой момент, который, как мне думается, надо было бы тщательнее проанализировать и в той или иной форме реализовать.

Второй момент, который здесь затрагивался, относительно практики выборов в Академию. Я считаю, что эксперимент проведен удачно. К примеру, по нашему Отделению секция машиностроителей пропускает всех претендентов на звание членов-корреспондентов РАН. Каким образом? Вначале было организовано прослушивание кратких (буквально десятиминутных) сообщений по основным результатам каждого претендента. Затем, обсудив каждую кандидатуру, секция выражает свое мнение. Дальше мнение экспертного совета секции, которое, кстати, не всегда совпадает с результатами выборов. Идет тщательный отбор, затем собирается Отделение, где при обсуждении опять может быть дополнительная «сортировка». Наконец, окончательные выборы на Общем собрании Академии наук.

На мой взгляд, направление такого совершенствования выборов претендентов — здоровое и правильное. Другое дело, что необходимо и организационное совершенствование. Нужно, чтобы каждая секция сохранила те функции, которые она имела вне Академии среди ученых и среди производственников (с кем контактировала, какие вела семинары, симпозиумы и т. п.). Это касается машиностроителей, энергетиков и специалистов по управлению системами.

Видимо, было бы весьма полезным делом обсудить и принять на Общем собрании соответствующее Положение, которое отражало бы особенности деятельности секции при вновь образованной структуре.

Вопросы организации проектирования и производства отечественного оборудования для нефтегазовой отрасли

1. Уважаемый председатель! Уважаемые участники совещания!

Я представляю здесь Опытное конструкторское бюро машиностроения (ОКБМ) Министерства Российской Федерации по атомной энергии. Это бюро было организовано в 1947 г. для создания некоторых видов оборудования по атомной проблеме. С 1969 по 1997 гг. я был директором и генеральным конструктором ОКБМ, а в настоящее время являюсь его научным руководителем.

За 50 лет в ОКБМ создано весьма разнообразное оборудование, в том числе: ряд диффузионных машин для обогащения урана, промышленные реакторы для наработки плутония, атомные энергетические установки для подводных и надводных кораблей ВМФ, атомных ледоколов, реакторные установки на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем для АЭС и др.

Привожу эту информацию для того, чтобы было ясно, что те соображения и предложения, о которых я буду говорить ниже, опираются на многолетний опыт коллектива, успешно решавшего задачи по созданию оригинального оборудования.

2. Актуальность темы данного совещания: обеспечение предприятий нефтегазовой отрасли отечественным оборудованием – не может вызывать сомнений.

Это объясняется:

- значимостью нефтегазовой отрасли для экономики России и даже для ее выживания;
- состоянием производства необходимого оборудования в стране;
- объективной возможностью дать толчок реанимации отечественного машиностроения в целом в ходе решения обсуждаемой (частной) задачи.

3. Мне представляется весьма важным реализовать предельно деловой, конкретный и рациональный подход при выработке условий, требований, организационных мероприятий по решению задачи. Необходимо понимать, что ее успешное решение в условиях современной России будет задачей чрезвычайной сложности.

Это обусловлено:

- размытостью, значительной неопределенностью структуры промышленности;
- отсутствием установившихся экономических и производственных связей между предприятиями, которые зачастую представлены самим себе;

- неопределенностью или даже отсутствием проверенных на практике схем управления и контроля применительно к задачам национального значения, к каким, безусловно, относится и обсуждаемая нами задача.

Отсюда вывод: для ее решения потребуется поиск и разработка разноплановых мероприятий (организационных и технических), которые могли бы компенсировать негативные особенности состояния нашей промышленности.

4. По силам ли нам эта задача в настоящее время?

Объективно для ее решения в первую очередь необходимы:

- квалифицированные инженерно-технические и производственные кадры;
- стабильное финансирование;
- наличие властного органа, который достаточно жестко, требовательно может выполнять функции управления и контроля на всех этапах решения задачи.

5. О кадрах. Несмотря на то, что за годы перестройки научно-производственному потенциалу, основу которого составляют кадры, нанесен весьма существенный ущерб, есть основания считать, что страна еще располагает достаточным научно-производственным потенциалом для решения масштабных национальных задач. Я сужу об этом в частности и по состоянию ОКБМ. За время перестройки ОКБМ потеряло 50 % своего состава, но по-прежнему сохраняет в своем составе крупный конструкторский коллектив, исследовательские и испытательные лаборатории, диагностический центр, опытное производство в составе трех машиностроительных цехов.

За годы перестройки в связи со значительным сокращением оборонных заказов ОКБМ получило возможность использовать свой научно-производственный потенциал в областях машиностроения, не связанных с атомной тематикой. Мы выполнили значительное число разработок оборудования для предприятий нефтегазовой отрасли, химической промышленности, молокоперерабатывающих предприятий, фармацевтической промышленности. Большая часть разработок доведена либо до поставки оборудования заказчиком, либо до изготовления и сдаточных испытаний головных образцов. Как правило, характеристики оборудования нашей разработки не только не уступают лучшим зарубежным образцам, но даже превосходят их.

Однако масштабы заказов этого оборудования оставляют желать лучшего и только из-за неплатежеспособности потенциальных заказчиков.

Структура и состояние ОКБМ, на мой взгляд, типичны для научно-производственных предприятий ВПК. Поэтому можно считать, что кадрами для решения обсуждаемой задачи страна располагает, и,

несомненно, привлечение предприятий ВПК к созданию высококачественного оборудования для нефтегазовой отрасли в сложившихся в стране условиях является наиболее оптимальным решением.

Следует заметить, что процесс привлечения предприятий ВПК уже идет, но пока что он не имеет организованного, системно продуманного характера. С этим нельзя мириться.

6. О финансировании. То, что организация надежного и стабильного финансирования имеет определяющий успешное решение задачи характер, не требует особых пояснений. Важно понимать, что без полной уверенности в обеспечении финансирования не следует приступать к разворачиванию работ, поскольку нельзя допустить компрометации важнейшего начинания среди участников-разработчиков и заинтересованных предприятий.

С другой стороны, медлить с кардинальным решением обсуждаемой задачи также нельзя не только исходя из интересов нефтегазовой отрасли. Следует не забывать, что научно-производственный потенциал страны переживает перманентный процесс диссипации, стареет по кадровому составу, из-за крайне недостаточного пополнения молодыми специалистами естественный процесс передачи накопленного опыта от старых молодым сводится на нет. Поэтому возможности организации решения задач национального масштаба с каждым годом существенно уменьшаются и через 5–7 лет могут достигнуть критического уровня.

Учитывая сказанное, считаю, что необходимо проявить настойчивость и изобретательность в поиске и организации надежного финансирования. По-видимому, решение этого важнейшего вопроса не следует связывать с бюджетными источниками, поскольку это мало реально и ненадежно.

По-видимому, решение следует искать на пути создания целевого фонда с привлечением средств заинтересованных предприятий и организаций.

7. Управление. Организационная сложность задачи требует эффективного управления, которое может быть достигнуто при наличии властного органа, наделенного необходимыми правами и соответствующими возможностями.

Определяющие функции управления:

- организация разработки оптимальной технической политики в отношении разработки проектов и производства оборудования для предприятий нефтегазовой отрасли;
- проведение жесткой политики экономии средств, времени при решении проблемы, как необходимое условие снижения себестоимости оборудования;
- определение очередности решения задач, исходя из объема располагаемых финансовых средств;

- утверждение порядка, условий приемки головных (опытных) образцов вновь разработанного оборудования;
- санкционирование запуска оборудования в серийное производство.

8. О необходимости системного подхода. Важно уяснить и принять к руководству, что создание оборудования для отрасли должно проводиться не как сумма отдельных частных разработок, а как реализация задачи оптимального оснащения нефтегазовой отрасли, как единой производственной системы. Для этого необходимо формирование некоторых общих требований, которым должно отвечать создаваемое оборудование.

Только при таком подходе будут достигнуты:

- согласованность требований к различному оборудованию;
- оптимальная унификация оборудования;
- минимизация финансовых затрат и снижение себестоимости;
- сокращение времени на организацию серийного производства оборудования.

Системный подход будет способствовать более качественной обработке конструкций, технологий изготовления, системы контроля качества при общем снижении финансовых затрат.

9. О технических требованиях к оборудованию.

При формировании требований к разрабатываемому оборудованию в технических заданиях необходимо не только ориентироваться на лучшие образцы международного рынка, но и предусматривать разумное превышение достигнутых в мире определяющих характеристик соответствующего оборудования (например: ресурс, надежность, потребляемая мощности и др.).

Только в этом случае наше оборудование будет конкурентоспособным и получит возможность занять подобающее место на международном рынке.

10. О порядке отработки и приемки вновь созданного оборудования.

Обоснование технико-экономических характеристик разрабатываемого оборудования должно включать проектные, экспериментальные исследования, а также результаты представительных испытаний опытного или макетного образца оборудования.

Заключительный этап приемки должен проводиться отраслевой комиссией с участием экспертов и представителей предприятий-пользователей.

Особого внимания при разработке и приемки требует оборудование, которое предназначено для использования в потенциальноопасных производствах, как, например, на нефтеперерабатывающих предприятиях.

11. Обеспечение сервисного обслуживания оборудования должно быть составной частью требований тематического задания.

Сервисное обслуживание может проводиться либо предприятием-разработчиком, либо предприятием-изготовителем.

Многолетний опыт авторского сопровождения своих проектов в эксплуатации позволяет утверждать, что сервисное обслуживание не только выгодно эксплуатации, но и весьма информативно для разработчика и изготовителя, поскольку инициирует процессы совершенствования конструкции, технологии и контроля.

12. Контроль качества.

Практика подтверждает, что только при сквозном контроле качества, охватывающем все этапы создания оборудования, возможно обеспечение проектных характеристик.

Предприятия ВПК имеют богатый опыт разработки и реализации систем контроля качества. Однако нельзя закрывать глаза на то, что за годы перестройки ответственность исполнителей, производственная дисциплина и общий уровень производственной культуры заметно упали. Поэтому формировать программы обеспечения и контроля качества необходимо с учетом этого факта.

Кроме того, рабочие контакты с рядом фирм Запада, а также аудиторская проверка контроля качества в ОКБМ, выполненная западными экспертами, убеждают, что кое-что еще полезное в части организации контроля можно и нужно позаимствовать у зарубежных фирм.

13. О сертификации оборудования.

В планах работ необходимо предусматривать сертификацию создаваемого оборудования как для внутреннего, так и международного рынков. ОКБМ имеет опыт и соответствующие лицензии на проведение сертификационных испытаний различного оборудования.

14. О возможном участии ОКБМ в решении обсуждаемой проблемы.

ОКБМ заинтересовано в участии по созданию оборудования для нефтегазовой отрасли и уже имеет некоторый опыт работы с рядом предприятий этой отрасли.

Важно отметить, что значительную часть оборудования ОКБМ может выполнять по полному циклу: проектирование, изготовление, испытание, поставка, сервисное обслуживание.

Заключение

1. Необходимость решения проблемы обеспечения предприятий нефтегазовой отрасли отечественным оборудованием и экономически, и политически оправдана.

2. Требуемыми для решения проблемы кадровыми и производственными возможностями страна располагает.

3. Оптимальная организация решения проблемы предполагает наличие управляющего органа, наделенного соответствующими полномочиями и возможностями.

4. Первоочередной и, по-видимому, наиболее трудно решаемой задачей является обеспечение надежного стабильного финансирования.

Тезисы выступления на Всероссийском совещании 03.09.1999

Уважаемые господа!

1. Вы все знаете, что у нас достаточно много и часто говорится о необходимости оживления нашей промышленности, порой высказываются неплохие идеи, дельные предложения. Все это объективно свидетельствует о понимании недопустимости для такого государства как Россия быть в полной зависимости от иностранных поставщиков, особенно когда речь идет об обеспечении необходимой работоспособности таких жизненно важных для России отраслей, как нефтегазовый, военно-промышленный и сельскохозяйственный комплексы.

Однако трудно найти положительные примеры перехода от слов к делу.

Конечно, в большой степени это обусловлено отсутствием обоснованной Государственной технической политики, но, по моему мнению, в меньшей степени это объясняется низкой организаторской культурой, которая рождается и развивается только в результате практической работы. Но имеющийся организаторский опыт в нашей промышленности целиком сложился при плановой экономике, поскольку наши некомпетентные реформаторы, опираясь на свое недомыслие и рекомендации зарубежных советников, свою руководящую деятельность свели только к ликвидации и компрометации накопленного опыта, на созидание чего-либо полезного их не хватило. Они не заметили, что вместе с грязной водой выбросили и ребенка.

Я счел необходимым отметить этот факт, поскольку уверен, что значительная часть прошлого опыта может быть весьма полезной и в современных условиях и, безусловно, должна быть адаптирована.

2. Имея некоторый опыт организаторской и производственной работы, полученный, в основном, при создании образцов новой техники в атомной отрасли, я позволю себе, не претендуя на исчерпывающую полноту, довести до сведения высокого собрания некоторые соображения, которые, надеюсь, могут способствовать практическому переходу от слов к делу в части оснащения отечественным оборудованием отраслей экономики нашей страны.

3. Прежде всего, следует уяснить и из этого исходить, что без продуманной государственной поддержки невозможно в сложившихся условиях поднять, модернизировать какую-либо отрасль с ориентацией на отечественное оборудование.

В чем может выражаться государственная поддержка?

Это соответствующие законодательные акты, тарифные и другие формы защиты отечественных производителей, льготное кредитование, налоговые и другие формы льгот, стимулирование разработки тематических планов создания новой техники для модернизируемых отраслей промышленности, назначение ответственных исполнителей работ по совершенствованию норм, стандартов, сертификатов в соответствии с международными тенденциями, обеспечение действенного контроля за ходом работ, распространением положительного опыта и др.

4. Следует иметь в виду, что обеспечение конкурентоспособности создаваемого отечественного оборудования (а это необходимое условие) потребует организационных решений на разных уровнях, а именно:

- назначение заказчика разработки проекта оборудования, который должен сформулировать и обоснованные технические требования к нему;
- установление порядка рассмотрения проектов, включая организацию экспертизы и их утверждения;
- назначение заводов-изготовителей оборудования;
- установление порядка испытаний головных образцов оборудования специальной комиссией;
- определение источников финансирования разработки проектов.

5. Создание конкурентоспособного оборудования предполагает наличие систематических поисковых работ по совершенствованию конструкции оборудования с учетом опыта эксплуатации аналогичного оборудования, растущих требований заказчиков и новых научно-технических достижений. Следовательно, для каждой отрасли промышленности должны быть определены предприятия, КБ или НИИ, для которых совершенствование того или иного оборудования является плановой тематической задачей.

Но не следует забывать, что конкурентоспособность оборудования определяется не только совершенством его конструкции и технологических процессов на заводе-изготовителе, но и ценой, куда в качестве составляющей, кроме прямых затрат, неявно входят и затраты, связанные с формированием и поддержкой всей системы рыночных институтов в России, которая пока что весьма и весьма отличается от так называемой цивилизованной западной рыночной системы.

Последние достаточно велики. Тщательный анализ транзакционных издержек при движении товара на рынке США (затраты на банковские и финансовые услуги, страхование, оптовую и розничную торговлю и др.) показал, что они составляют более 45 % национального дохода. Нет оснований сомневаться, что для рынка России этот процент может быть только выше.

Доктор экономических наук С.Ю. Глазьев считает: «При тех ценах, которые сложились в период до 17 августа (1998 г.), экономический рост был просто невозможен, чтобы эффективно конкурировать на мировом рынке, наши предприятия должны были бы демонстрировать в пять раз большую производительность, нежели, скажем, их европейские конкуренты, поскольку процентные ставки по кредитам были у нас в 10 раз выше, а цены на энергоносители – в два раза выше, чем в Европе. Даже дешевый труд не мог компенсировать подобных диспропорций в экономических оценках. Поэтому регулирование цен, регулирование ставок процента (кредита)... является необходимой предпосылкой экономического роста».

Таким образом, можно утверждать, что организация эффективной государственной поддержки и защиты отечественного производителя оборудования является необходимым и определяющим условием для реанимации предприятий-изготовителей оборудования в интересах любой отрасли экономики.

6. Из всего сказанного наибольшая неопределенность относится, по-видимому, к финансовому обеспечению работ, особенно на стадии проектирования.

Мне представляется, что практическое решение этой проблемы можно найти на пути создания коммерческого фонда на основе вкладов предприятий, заинтересованных в создании оборудования. Но наличие такого фонда предполагает учреждение управляющего органа, наделенного соответствующими полномочиями и контролирующего все этапы создания оборудования.

7. Не могу не остановиться на одном вопросе, который имеет существенное значение для предприятий России в современных условиях.

Известно, что повышение качества оборудования, его технических, ресурсных характеристик, как правило, сопровождается повышением его цены. При нормальных условиях предприятия, безусловно, стараются приобретать лучшее оборудование, следуя французской поговорке: «Мы не настолько богаты, чтобы покупать дешевое». Но большинство наших предприятий в настоящее время лишено оборотных средств и во многих случаях вынуждены приобретать оборудование худшего качества, но более дешевое, то есть следуют русской поговорке: «Не до жиру – быть бы живу».

Поскольку такое положение предприятий в России изменится явно нескоро и не вдруг, считаю целесообразным предусмотреть в той или иной форме возможность отступления от требований «по качеству» в угоду соотношению «цена—качество».

8. Для того, чтобы наше совещание послужило действенным толчком для организации практической работы по реанимации какой-то части промышленных предприятий, мне представляется необходимым:

1. На правительственном уровне (Министерство экономики) определить отрасль экономики, в интересах которой в первоочередном порядке необходимо реанимировать некоторые предприятия промышленности для изготовления соответствующего оборудования.
2. Организовать Рабочий комитет из числа компетентных специалистов, ориентирующихся в потребностях и нуждах выбранной отрасли, и специалистов, имеющих опыт в планировании, организации масштабных работ в «доперестроечный» период.
3. Обязать указанный Рабочий комитет подготовить с учетом системного подхода Перечень мероприятий, необходимых для разработки рабочих планов развертывания работ по созданию ответственного оборудования для выбранной отрасли.

Я рассматриваю эти три предложения как необходимое условие для перехода от слов к делу. Если мы в очередной раз ограничимся решением, состоящим из общих фраз, то уверен, что такой переход в скором времени не состоится.

А ситуация, господа, требует безотлагательно надевать рукавицы и браться за рычаги.

Благодарю за внимание!

Тезисы выступления на конференции в Нижегородском государственном университете им. Н.И.Лобачевского 28.09.1999

Уважаемые участники конференции!

1. Приветствуя вас в связи с началом работы конференции, позволю себе воспользоваться представившейся возможностью, чтобы высказать некоторые соображения относительно определившихся тенденций в ведущих отраслях машиностроения. Поскольку инженерная практика должна отслеживать изменяющиеся условия, предъявляемые требованиям к изделиям, то неизбежна постановка новых задач в материаловедении, прочности и надежности.

2. Тенденции, отмечаемые в машиностроении сегодня, следующие:

- ужесточение требований к ресурсной надежности на большей временной базе;
- увеличение календарного времени, в течение которого изделие используется по назначению; например, назначенный ресурс вновь проектируемых АЭС — 60 лет (это приводит к необходимости учета такого фактора, как старение конструкционных материалов);
- максимально возможное использование остаточного ресурса в процессе эксплуатации (за пределами назначенного ресурса); для этого необходимо обеспечить в процессе эксплуатации корректное определение остаточного ресурса и контроль за его использованием; мотивация этого требования — экономика (например, атомный ледокол «Ленин», «Копролактан»);
- снижение себестоимости изделий.

Нетрудно видеть, что в реализации этих тенденций весьма значительную роль играют различные задачи прочности и надежности.

Не могу не подчеркнуть, что корректность решения этих задач особенно значима при проектировании потенциально опасных систем. Это диктуется требованиями гарантированного исключения недопустимых последствий технически возможных аварий. При этом должно учитываться, что проведение прямых представительных испытаний в процессе проектирования и при эксплуатации для подтверждения проектного уровня безопасности во многих случаях невозможно либо по техническим, либо по экономическим причинам.

Это предъявляет дополнительные требования к обоснованности используемых теоретических моделей.

3. Имея в виду сказанное, следует ожидать, что ужесточившиеся требования будут приводить: в одних случаях либо к новым задачам, либо к новой формулировке уже известных задач; в других случаях — к корректировке существующих алгоритмов их решения.

В числе актуальных задач, ждущих своего достаточно корректного решения, считаю необходимым обозначить следующие:

- определение НДС конструкций с максимально корректным учетом их геометрии в упругопластической постановке и воспроизведением особенностей их нагружения, включая возможную нестабильность температурного состояния;
- определение НДС оболочечных конструкций с гетерогенной структурой (типа защитных оболочек атомных станций);
- разработка методов расчета накопления повреждений в оболочечных и трубопроводных конструкциях для оценки ресурса работы соответствующего оборудования до зарождения трещин; времени развития трещин до их критических размеров или превращения их в сквозные;
- масштаба раскрытия сквозных трещин различной (произвольной) ориентации (важно при исследовании вопросов безопасности, связанных с течью).

Учитывая заведомо прикладной характер указанных задач, полное их решение предполагает в качестве завершающего этапа разработку расчетной программы и ее верификацию.

Необходимо заметить, что перечисленные задачи в той или иной постановке имеют свою предысторию исследования. Однако во многих случаях современная инженерная практика уже не может удовлетвориться имеющейся постановкой (формулировкой) этих задач, корректностью их решения, полнотой фактической верификации.

4. Уважаемые участники конференции!

Хочу Вам пожелать хорошей творческой атмосферы на конференции, активных дискуссий, и выразить надежду, что вы получите удовлетворение от участия в работе конференции. Будет совсем хорошо, если конференция подскажет вам конкретные задачи для дальнейших исследований.

Тезисы выступления на открытии конференции по теории оболочек и пластин, 17.09.2002

1. Уважаемые участники конференции!

Позвольте приветствовать вас и пожелать активного участия в работе конференции!

Тематика конференции традиционна – теория оболочек и пластин. Актуальность этой тематики не может не вызывать сомнений, хотя в наше время стремительного внедрения высокопроизводительной вычислительной техники в сферу научных исследований и появившейся возможности решения задач в трехмерной постановке порой и раздаются голоса, что теория оболочек себя изжила. Однако объективный анализ приводит к заключению, что оба направления решения задач механики и впредь будут развиваться параллельно, взаимодействовать и дополнять друг друга. Действительно, некоторые оболочечные задачи в общей постановке ближе к общей теории, а локальные задачи во многих случаях решаются эффективнее соответствующими программными кодами на ЭВМ.

Следует заметить, что поток публикаций по теории оболочек не ослабевает. Поэтому есть основания считать, что и в данном случае справедлива любимая фраза академика Н.Н.Боголюбова: «Нет ничего практичнее хорошей теории».

2. Предыдущая конференция, посвященная теории оболочек и пластин, в своем заключении отметила, что наиболее актуальными проблемами (задачами) по этому научному направлению в настоящее время являются:

- разработка физически обоснованной теории оболочек, учитывающей особенности поведения оболочечных тел при их взаимодействии с окружающей средой;
- методология оценки погрешностей и области применения нетрадиционных теорий оболочек и пластин;
- развитие эффективных схем метода конечных элементов, метода граничных элементов применительно к задачам теории оболочек и пластин;
- совершенствование методов исследования процессов разрушения, потери устойчивости и несущей способности оболочечных конструкций при различных видах нагружения (статические,

динамические, ударные) с учетом взаимодействия с контактирующими средами;

- развитие экспериментальных методов исследования процессов деформирования оболочек.

3. Полагаю, что нет оснований сомневаться в актуальности решения этих проблем для развития и совершенствования теории оболочек и пластин, но необходимо подчеркнуть исключительную важность их решения и для прикладных целей.

В настоящее время в промышленности определились ряд отраслей, создающих сложные технические системы, от ресурсной надежности которых зависят безопасность окружающей среды и населения, экономические характеристики, включая экономический риск.

К числу таких систем относятся авиация, энергетические объекты и, в первую очередь, атомная энергетика, химические производства, трубопроводные коммуникации газа, нефти и других потенциально опасных сред.

В этом отношении характерна сложившаяся ситуация в атомной энергетике. Приемлемость атомной энергетике для общества достигается за счет обеспечения гарантированной безопасности, что неизбежно связано с увеличением капитальных затрат на создание АЭС, а экономическая рентабельность их обеспечивается, в основном, за счет увеличения мощности АЭС и срока службы до 50–60 лет и даже более. Увеличение срока службы – это соответствующе увеличение ресурсной надежности оборудования, в первую очередь, незаменимого в процессе эксплуатации.

Увеличение ресурса оборудования требует соответствующей полноты корректного учета при проектировании всех действующих факторов, которые могут негативно сказаться на ресурсе (начиная со стадии изготовления, монтажа, в процессе эксплуатации). При этом, большое значение могут иметь учет остаточных напряжений и деформаций на стадии изготовления и монтажа, физической нелинейности поведения материала, деградация и старение материала, корректное описание развития трещин.

В принципе все эти задачи охватываются упоминавшимся ранее перечнем наиболее актуальных проблем, подлежащих решению, который был сформулирован и предыдущей конференцией.

Однако следует иметь в виду, что сложность решаемых проблем исключает надежды обеспечить требуемую ресурсную надежность сложных технических систем только теоретическими методами на стадии проектирования. Необходимо обеспечение их системами контроля расходования ресурса в процессе эксплуатации с оперативной

оценкой остаточного ресурса. Создание таких мониторинговых систем сейчас представляется реальным делом.

Следует заметить, что при их создании необходимо в полной мере использовать достижение теории оболочек и пластин.

4. Я надеюсь, что сообщения, которые будут сделаны на нашей конференции, результаты конкретных исследований внесут весомый вклад в копилку знаний по теории оболочек и будут способствовать решению актуальных инженерных задач.

Тезисы выступления на открытии семинара по теме «Сборка» (г. Брянск, 02.10.2001)

1. Уважаемые господа! Позвольте от имени Организационного комитета приветствовать собравшихся здесь участников семинара!

2. Объявленная тематика нашего семинара, безусловно, является весьма актуальной. Это обусловлено рядом следующих причин.

Сборка является заключительной операцией при изготовлении любых машин и приборов. Качество выполнения этой операции определяется большим числом факторов, которые должны надежно контролироваться в процессе сборки, а их значения учитываться и индивидуально, и в совокупности. Во многих случаях возникающие при этом задачи отнюдь не тривиальны для положительного решения. При некачественном выполнении сборки может быть сведен «на нет» труд конструкторов и изготовителей составляющих узлов. Необеспеченная работоспособность агрегатов может приводить не только к экономическому ущербу, но и к недопустимым аварийным последствиям.

Важным также является и другой аспект. В большинстве случаев операция сборки вносит существенный вклад в себестоимость изделия. Поэтому оптимизация этой операции имеет технико-экономический характер, то есть актуальна и в чисто экономическом плане.

3. Вопросы технологии сборки по-разному решаются в различных производствах, поскольку при этом в полной мере должны учитываться особенности конструкций и производств. Следствием этого является некоторая автономность в развитии культуры, совершенствовании сборочных операций различных производств.

Однако, несомненно, в решениях сборочных технологий каждого производства могут быть и такие, которые представляют интерес и для других производств. В частности, для любых сборочных производств надежный контроль человеческого фактора является актуальной проблемой.

Я считаю, что проведение семинаров, подобных нашему, будет способствовать обмену положительной информацией между специалистами различных производств.

4. Обмен опытом особенно актуален в части разработки и внедрения технологий сборки с использованием современных возможностей электронно-вычислительной техники, поскольку при этом реализуются дополнительные возможности повышения качества и надежности сборки и решаются вопросы автоматизации управления сборочными процессами.

5. Я надеюсь, что упомянутые и другие проблемные вопросы сборочных процессов будут в той или иной мере отражены в докладах и при активном обсуждении их участниками семинара.

Насущные проблемы сборочных технологий в отечественном производстве*

Научная сессия по вопросам прогрессивных технологических процессов в машиностроении — актуальная по тематической направленности. Это обусловлено тем, что последние 10 лет отечественное машиностроение не только не совершенствовало свои конструктивные, технологические решения, организацию производственных процессов, но, напротив, переживало и, к сожалению, продолжает переживать стадию глубокого развала, который сопровождается потерей квалифицированных кадров, частичной утратой знаний, опыта, умения, потерей производственной дисциплины, зачастую и чувства ответственности у исполнителей работ. В то же время возрождение экономики, важнейшей отраслью которой является машиностроение, есть жизненная необходимость для нашей страны. Поэтому настоящее собрание ученых, специалистов-машиностроителей, безусловно, должно внести свою лепту в решение этой проблемы.

* Тезисы доклада на VIII научной сессии «Прогрессивные технологические процессы в машиностроении», 9–10 апреля 2002 г.

Возрождение экономики России связывается с выходом на международный рынок отечественной промышленной продукции и в первую очередь машиностроительной, которая должна быть этих стандартов, требований, включая и стоимостные, с учетом реального состояния большинства наших машиностроительных предприятий, является сложнейшей, но вполне разрешимой задачей при надлежащей организации целенаправленных работ. Не совсем оправдана ориентация только на традиционные эволюционные подходы к решению задач по совершенствованию конструкций машин, технологий изготовления в сложившихся условиях. Необходимы совершенно качественно новые решения. Только на этом пути можно надеяться на достаточно быстрое появление нашей конкурентоспособной продукции на международном рынке. В обеспечении конкурентоспособности машиностроительных изделий большая роль отводится стадии сборки, — заключительному этапу изготовления продукции. Это в равной степени относится к изделиям серийным, мелкосерийным и единичным. Практика показывает, что трудоемкость сборочных работ достигает 25–40 % общей трудоемкости изделия, что находит отражение и в стоимости изготовления. Еще больше значимость этапа сборки в обеспечении качества изделия, поскольку некачественная сборка может привести на нет и качественно выполненную работу по изготовлению изделий на всех предшествующих этапах.

Поэтому вопросы отработанности технологии сборки, представительности операционного контроля, профессиональной подготовленности и ответственности имеют решающее значение.

Учитывая реальное положение на большинстве машиностроительных предприятий, можно обоснованно сомневаться в достаточной эффективности традиционных путей для восстановления опыта, утерянного за десять лет перестройки, а также компенсации вынужденного отставания в области технологий от передовых стран в приемлемые сроки.

Поиск новых путей затрудняется в какой-то степени тем, что недостаточно полно сформулированы научные принципы сборочных процессов. Пополнению и совершенствованию этих принципов, несомненно, будут способствовать периодические встречи ученых, специалистов, работающих в этой области, на конференциях, симпозиумах, и обсуждения актуальных вопросов сборочных технологий и производств. Целесообразно в этой связи обратить внимание на возможности, которые представляет компьютерная техника.

Для эффективного решения сборочных проблем практика указывает на необходимость и результативность отработки технологии сборки сложных технических систем на представительных моделях.

Это, естественно, требует дополнительных затрат времени, средств, трудовых ресурсов, хотя в конечном итоге все это оправдывается. Так, например, при проектировании судовых ядерных установок в ОКБ машиностроения (Н.Новгород) обязательным этапом всегда было создание натуральных по размерам макетов для проверки: технологии монтажа, собираемости, предусмотренных проектом профилактических и ремонтных работ. Создание макета, его анализ требуют много времени и средств. После появления соответствующей компьютерной техники необходимость в создании таких работ отпала, а качество отработки технологии возросло при минимальных затратах труда и времени.

Еще большую результативность обещает внедрение в инженерную практику идеологии виртуальной сборки и испытаний новых изделий. При этом сборка реально происходит только в памяти компьютера, то есть реализуется адекватная математическая модель изделия и процесса, отражающая все определяющие его конструктивные особенности. С компьютерной моделью можно проводить все действия, как и с реальным изделием, а именно: варьировать процесс сборки в целях его оптимизации, например, за счет допусков, селективной выборки, определения замыкающего звена; испытания с имитацией рабочих условий и даже имитацию длительной эксплуатации. Такой подход, несомненно, позволит существенно повысить качество сборки, уменьшить влияние факторов случайности и улучшить технико-экономические показатели сборочного процесса (время, трудозатраты и др.).

Системно продуманная программа работ по обеспечению конкурентоспособности любого машиностроительного изделия должна предусматривать максимальное использование компьютерных возможностей для повышения качества и оптимизации технико-экономических показателей.

Конечно, это предполагает организацию большой целенаправленной работы. Здесь нужна компьютерная грамотность, культура, так как разработка адекватных математических моделей машинных агрегатов, сложных технических систем является достаточно сложной задачей.

Необходимо готовить специалистов с соответствующим уровнем знаний математики, физики, механики. Следовательно, это должно найти отражение в учебных программах вузов.

О роли атомной энергетики в обществе*

Уважаемый коллеги, уважаемые участники конференции!

Позвольте приветствовать Вас и пожелать плодотворной работы Вашей конференции!

Мы живем в трудное, сложное время, вообще говоря, неблагоприятное для рождения творческих замыслов, разработок и, тем более, их реализации. Однако я хочу верить, что большинство из нас патриоты. Уже по одному этому имеются основания ожидать от молодых ученых инициативных начинаний, достойной помощи тем, кто ищет и работает, чтобы Россия поднялась с колен и как можно быстрее, поскольку унижительная поза на коленях ее не достойна.

Выпускники Нижегородского технического университета достаточно много сделали для страны в различных областях техники, в частности, для атомной энергетики. Многие из них стали ведущими специалистами и даже Генеральными директорами крупных заводов. Например, Балтийский завод.

В настоящее время для экономического развития страны в ряду определяющих проблем при любой стратегии возрождения следует считать:

- энергообеспечение;
- модернизацию машиностроительной отрасли в целях организации выпуска оборудования, и для внутреннего потребления, и конкурентоспособных машин, агрегатов для международного рынка.

Я не случайно назвал энергообеспечение страны, поскольку Россия в этом плане подошла вплотную к кризисному состоянию, что характеризуется значительным спадом производства электроэнергии. За годы перестройки недопустимая изношенность оборудования энергостанций на органическом топливе составила более 60 %. А без

* Выступление на конференции молодых ученых Нижегородской области, ННТУ, 2001 г.

энергетики ни о каком возрождении говорить нельзя. Авторский коллектив из пять академиков в статье, помещенной в «Вестнике Российской академии наук» за 2001 г. (Добрецов, Н.П. Лаверов и др.), убедительно показал, что для достижения энергопроизводства на уровне 1990 г. при целенаправленной работе потребуется около 30 лет.

Поэтому я и выбрал для своего сообщения на этой конференции тему: «Атомная энергетика и ее роль в развитии общества», поскольку при разработке стратегии решения проблемы энергообеспечения России не учитывать возможностей атомной энергетике было бы безграмотно и недопустимо.

Общепринято считать, что человек начинается с того момента, когда гоминиду осознанно удалось впервые защитить свой первый костер. До этого он мало чем отличался от животного, поддерживая свое существование собирательством и примитивной охотой с использованием камня и дубины. Только научившись разжигать костер, гоминид начал новую, до этого не существовавшую, человеческую историю.

Действительно, историю человеческого общества можно изложить как историю создания и развития энергоисточников, обеспечивающих существование общества. Каждый новый энергоисточник приносит существенные и даже кардинальные изменения в структуру и функционирование составных частей и общества в целом. Цепочке основных энергоисточников, сменявших друг друга, соответствует цепочка изменений в структуре и состоянии общества (см. таблицу).

Номер п/п	Наименование основного энергоисточника	Состояние общества
1	Мускульная сила человека	Раннее племенное общество
2	Тягловые одомашненные животные	Первобытное племенное общество
3	Рабство и тягловая сила	Первобытное рабовладельческое общество
4	Водяное колесо, водяная мельница	Рабовладельческое общество, элементы государственности
5	Парус, ветряки	Развитое рабовладельческое общество
6	Паровая машина	Развитие феодальное и элементы промышленного общества
7	Двигатель внутреннего сгорания, электрогенератор	Развитый капитализм

Я полагаю, что такая зависимость будет иметь место и в предвидимом будущем, то есть рождение нового определяющего энергоисточника не просто заменяет устаревший, а существенно изменяет и структуру общества, и характер его функционирования.

Поэтому нет оснований думать, что появление атомной энергетики не приведет к аналогичным изменениям в обществе.

Какие особенности атомной энергетики будут определять возможные изменения?

Во-первых, повышенная потенциальная опасность атомной энергетики. Потенциальная опасность в нормальных рабочих режимах атомных станций никак себя не проявляет, поскольку никаких радиоактивных выбросов, превышающих естественный фон, атомные станции при этом не допускают. Для аварийных режимов после аварий на АЭС «Три-Майл-Айленд» и в Чернобыле Международным сообществом ученых и специалистов под эгидой МАГАТЭ разработаны рекомендации, которые вошли в национальные требования по безопасности АЭС. Согласно этим рекомендациям, при любых физически возможных аварийных состояниях должны быть предусмотрены физические барьеры, исключающие недопустимое воздействие на окружающую среду и население. В ряду этих аварий проектант должен рассматривать и расплавление активной зоны, если не может с полной достоверностью доказать, что расплавление активной зоны исключается.

Следует заметить, что потенциальная опасность свойственна энергоисточникам любого типа. Однако повышенная потенциальная опасность атомной энергетики обусловлена тем, что в реакторах может накапливаться весьма большая радиоактивность за счет отработавшего ядерного топлива. Тот факт, что человек своими органами чувств непосредственно не воспринимает ядерных излучений, только усиливает повышенную настороженность общества по отношению к атомной энергетике.

С момента открытия ядерных излучений изучение воздействия их на вещество, различные материалы, на все живое, включая человека, стало самостоятельным направлением научных исследований и к настоящему времени сформировалось в ряд специализированных наук, из которых радиационная медицина играет ведущую роль, поскольку непосредственно занимается защитой, охраной здоровья человека, определяя допустимые нормы воздействия различных ядерных излучений. Отправляясь от норм, ученые разработали методологию проектирования физической защиты населения и окружающей среды от ядерных излучений, которая непрерывно совершенствуется и корректируется по мере появления новой информации о воздействии ядерных излучений.

Однако убедить широкую общественность в надежности спроектированной защиты потенциально опасной системы, какой и является любая реакторная установка, не прибегая к технической логике, описанию проектных решений, не используя специальных терминов, технического языка практически невозможно. Выход из этой тупиковой ситуации, на мой взгляд, один. С одной стороны, поддерживать максимально возможную культуру проектирования реакторных установок и АС в целом, гарантируя ее безопасность с учетом необходимой консервативности решений. С другой стороны, воспитывать в обществе определенную степень доверия к ученым и специалистам, дающим свои официальные заключения о безопасности АС.

Конечно, доверие будет расти и укрепляться при повторяющихся встречах специалистов с общественностью. Но основным средством для воспитания доверия будет, безусловно, исключение недопустимых проявлений потенциальной опасности на всех работающих АС в мире.

Другой важной проблемой для будущего атомной энергетики является обеспечение безопасного обращения с отработавшим ядерным топливом начиная с момента выгрузки из реактора и кончая захоронением остатков, не подлежащих дальнейшему использованию.

После выгрузки отработавшее ядерное топливо проходит ряд стадий до захоронения, а именно:

- длительное хранение, в течение которого за счет распада короткоживущих нуклидов существенно снижается мощность остаточного тепловыделения;
- процесс переработки отработавшего топлива в целях извлечения полезных компонентов для дальнейшего использования;
- «выжигание» нестабильных нуклидов с большим периодом полураспада (младшие актиноиды) в отходах переработки отработавшего топлива в реакторах на быстрых нейтронах или специализированных ускорителях;
- упаковка отходов переработки, прошедших «выжигание»;
- захоронение упакованных «отходов» в специальных могильниках, рассчитанных на безопасное захоронение в течение многих столетий.

Сложность окончательного решения проблемы обращения с отработавшим ядерным топливом определяется последним этапом — захоронением из условия безопасности для окружающей среды в течение многих столетий.

К настоящему времени все перечисленные этапы изучаются с целью отработки технологий, выбора материалов, уточнения отдельных

процессов, практического опробования. Хотя полного опробования системы захоронения еще не проведено, но необходимый уровень технического обоснования качественного решения проблемы обращения с отработанным ядерным топливом в целом достигнут.

Становление и развитие атомной энергетики уже привело к появлению нового знания, новых специализаций, повышенных требований как к проектантам, конструкторам, так и к эксплуатационному персоналу. Это, несомненно, приведет к рождению новой технологической культуры, поскольку широкое внедрение любой новой технологии невозможно без соответствующего изменения в мышлении, представлениях и поведении людей, ее использующих.

Делая акцент на изменениях в представлениях, мышлении, культуре общества, вызванных широким внедрением атомной энергетики, я исхожу из того, что достижение гармонического существования общества и природы, о котором пророчествовал академик В.И. Вернадский, предполагает не только внедрение новых технологий, удовлетворяющих ряду требований, включая и экологические, но и изменения в представлениях и поведении общества.

Я полагаю, что задача высшей школы – своевременно отслеживать грядущие изменения в технологиях и учитывать в учебных программах необходимость соответствующих изменений.

О необходимости согласования темпов развития науки, технологии и нравственного совершенствования общества*

Уважаемые господа!

1. Позвольте приветствовать вас, поздравить с началом работы конференции и высказать пожелание, чтобы она была продуктивной и оправдала ожидания, надежды участников!

2. Я полагаю, что ваши собрания (конференции, семинары и др.) весьма актуальны. Это обусловлено сложившейся ситуацией в мире в целом, и в России, поскольку как никогда стало ясно, что развитие общества определяется наукой, новыми технологиями. Но большая часть научно-технических проблем, требующих эффективного решения, ложится на плечи вашего поколения ученых.

В связи с этим позволю себе высказать некоторые соображения о состоянии некоторых направлений науки и перспективах ее развития.

3. Что наиболее характерно в этом плане для нашего времени? Прошрое столетие обеспечило невиданный прорыв во всех областях науки и техники, создало условия для рождения и становления новейших технологий, как то: атомная энергетика, биотехнология, инженерная генетика, нанотехнология и др.

Достижения науки, новейших технологий, несомненно, приведут к качественным изменениям во всех областях техники, в энергопроизводстве, сельском хозяйстве, медицине и др., а в итоге и в социальной сфере.

Многое из этого уже в стадии реализации, и убедительные подтверждения этому нетрудно найти. Достаточно представить себе все последствия, которые связаны с появлением в нашем обществе компьютера.

* Выступление на конференции молодых ученых в НГТУ 26.05.2004

Особое значение для общества будут иметь изменения в энергопроизводстве:

- Дело в том, что энергопроизводство во все времена имело определяющее значение для развития цивилизаций, их становления, качества (первый костер, тягловая сила, рабство, водяная и ветровая мельницы, парус, паровая машина, дизель, электродвигатель, ядерная энергия – история становления и развития человечества).
- Особенности и преимущества атомной энергетики (неисчерпаемость, экологическая чистота, универсальность применения, водородная энергетика и др.).
- Потенциальная опасность – рекомендации МАГАТЭ, проблемы отработавшего топлива.
- Настороженность общества, «зеленые» – форма защиты от непродуманных, некачественных решений.
- Необходимость воспитания доверия к науке, ученым в обществе – процесс двусторонний.

Я нарисовал достаточно реальную картину, связанную с энергетикой.

Следует заметить, что в последние годы сразу на трех установках в мире был достигнут принципиальный результат: энергия, которая выделяется в результате термоядерного горения, уже превосходит энергию, которая необходима для создания и удержания плазмы. Это, несомненно, качественно важный результат в решении управляемого термоядерного синтеза.

Другие области науки также, при своем дальнейшем развитии, могут дать результаты, которые будут способствовать процветанию человечества.

4. Казалось бы, можно только радоваться недалекому будущему, надеясь на то, что не будет нищих, обездоленных, искоренится зло, братоубийство, и люди забудут о бесцельных кровавых войнах и неоправдываемых разрушениях.

Однако, если оглянуться на прошлое и немного задуматься, то нельзя не заметить тот факт, что в абсолютном большинстве случаев новые достижения науки и инженерии находили первоочередное использование в военной и других областях и зачастую отнюдь не в интересах человечества.

К этому следует добавить растущую тенденцию использования новых технологий при совершении уголовных преступлений, террористических актов и других криминальных деяний. В качестве характерного примера можно упомянуть о преступлениях, связанных с пересадкой жизненно важных органов человека, психотропных

средствах воздействия — зомбировании и др. Этих тенденций нельзя не учитывать.

5. В чем причина такого состояния человеческого общества? Преодолимо ли оно? Принципиальная важность этого вопроса для будущего человечества не может вызывать сомнений.

Я далек от того, чтобы претендовать на исчерпывающий ответ, но не могу не обратить внимания на следующий факт, имеющий отношение к этой проблеме, а именно: темпы развития научного знания и технологий в настоящее время значительно опережают прогрессивные изменения нравственных, моральных канонов и установившихся традиций в обществе.

Причина этого заключается, по-видимому, в том, что фундаментальные научные и технологические достижения являются результатом деятельности элитных групп ученых или даже отдельных выдающихся личностей, которые, как правило, отличаются высокой нравственностью и в своей деятельности не руководствуются злыми мотивами во вред человечеству. Но нравственные нормы и традиции в обществе являются результатом естественного отбора, в котором участвует большая часть общества, и для своего установления они требуют длительного времени и даже смены поколений. Весьма важно помнить, что законами невозможно сколько-нибудь существенно повлиять на формирование нравственных канонов и традиционного права. Поэтому, когда соответствующие научные и технологические достижения становятся общедоступными, не исключается использование их во вред человечеству отдельными пользователями, не отличающимися высокой нравственностью и уважением к традициям, закону.

Отсюда следует, что опережающее по скорости развитие науки и техники по сравнению с прогрессивными изменениями нравственных норм, традиций начиная с какого-то момента может оказаться опасным и даже недопустимым для общества.

Поэтому некоторые социологи и психологи заговорили о наличии зависимости, формулируемой в виде «Закона техно-гуманитарного баланса: чем выше мощь производственных и боевых технологий, тем более совершенные механизмы сдерживания агрессии необходимы для сохранения общества».

Фиксируется и такой важный результат: «Технологический потенциал общества делает социальную систему менее зависимой от состояния и колебаний внешней среды, но вместе с тем более чувствительной к состояниям массового и индивидуального сознания».

Отсюда делается вывод, что удельный вес антропогенных кризисов в обществе по сравнению с кризисами внешнего происхождения в ходе исторического развития должен возрастать.

Согласование темпов развития науки и морали, нравственности за счет искусственного замедления развития науки, технологий, конечно, недопустимо, поскольку это негативно скажется на решении социальных и других проблем общества. Поэтому для общества весьма важно своевременно уметь достаточно корректно прогнозировать и оценивать возможные недопустимые последствия, которые могут реализовываться при опережающей реализации новых научных и технологических достижений. Это позволило бы выработать и своевременно внедрять в обществе изменения норм поведения, которые бы предупредили или свели к минимуму негативные последствия.

Однако нужно помнить, что нравственные нормы, традиции — это не законы, и они могут быть приняты обществом только в результате целенаправленной воспитательной работы, от организации которой руководители государств не могут и не должны уstraняться. Возможно ли это? Практика подтверждает возможность такого целенаправленного воспитания.

Действительно, достаточно посмотреть на имеющийся опыт внедрения новых мод, стилей, последствия бесконтрольной деятельности СМИ, влияния кинофильмов-боевиков на поведение, привычки молодежи и др.

6. Но и здесь необходим научный подход. За последние несколько десятилетий учеными сделано довольно много, на мой взгляд, удачных попыток использования системного анализа, теории автоматического управления применительно к различным проблемам социальных, гуманитарных, демографических и других общественных наук. В связи с этим начали говорить о такой науке как теоретическая история. Полученные результаты внушают оптимизм и не вызывают сомнений, что ученые будут продолжать свои усилия в этих направлениях. Поэтому я полагаю, что возможность и способы приведения в соответствие темпов развития науки, технологий и изменения нравственных канонов, традиций в обществе могут, в принципе, быть обоснованы и затем реализованы для практического использования.

Мне представляется, что одним из основных мероприятий в решении этой проблемы будет использование системного анализа и теории управления применительно к общественным, социальным проблемам и к развитию общества в целом. К сожалению, в России такое направление исследований официальными органами недооценивается.

7. Кстати, полномасштабное использование методологии системного анализа уже сейчас было бы одним из наиболее эффективных

средств при выборе обоснованных мероприятий для преодоления в нашей стране экономического кризиса. Именно на этом пути можно также наглядно прояснить и такие проблемы, как противостояние «западников» и «славянофилов», почему нельзя однозначно заимствовать для России подходы Запада при решении наших экономических и социальных проблем, определить, какая программа развития для России будет наиболее обоснованной и эффективной?

8. Уважаемые господа, в своем выступлении я пытался грубыми мазками обозначить одну из важнейших научных проблем, стоящих перед человечеством, без решения которой, по моему мнению, гармоничное развитие цивилизации, с переходом к так называемой ноосфере, которую предсказывал академик В.И. Вернадский, нереально.

Желаю вам внести свой вклад в решение этой грандиозной проблемы!

Благодарю за внимание.

Перечень избранных публикаций Ф.М. Митенкова

1. *Митенков Ф.М., Авербах Б.А., Горбунов Л.М. и др.* К расчету доплеровского температурного коэффициента реактивности гомогенных реакторов // Атомная энергия, 1966, № 21, вып. 5.
2. *Митенков Ф.М., Щекин Ю.К.* Зависимость плотности радиационных дефектов в стали от энергетического спектра нейтронов // Вестник АН БССР, № 4, 1966. Серия физико-технических наук.
3. *Митенков Ф.М., Моторов Б.И., Моторова Э.В.* Простейшая математическая модель для исследования динамики водо-водяных реакторов в режиме саморегулирования // Атомная энергия, т. 21, вып. 5, 1966.
4. *Митенков Ф.М., Моторов Б.И., Романов И.Н.* Об устойчивости релейной системы поддержания температуры в первом контуре ЯЭУ // Сб. МИФИ «Управление ЯЭУ», вып. 2, 1967.
5. *Митенков Ф.М., Ринейский А.А., Багдасаров Ю.Е. и др.* Обеспечение надежного отвода тепла от реакторов БН-350 // Международная конференция по безопасности быстрых реакторов. Кадараш, Франция, 1967 г.
6. *Лейпунский А.И., Африкантов И.И., Митенков Ф.М. и др.* Атомная электростанция БН-350 // Симпозиум стран-членов СЭВ «Состояние и перспективы работ по созданию АЭС с реакторами на быстрых нейтронах», Обнинск, 1967 г., с. 123–150.
7. *Митенков Ф.М.* Атомная электростанция БН-600 // 7-я Мировая энергетическая конференция, 1968 г.
8. *Лейпунский А.И., Африкантов И.И., Митенков Ф.М. и др.* Атомная электростанция с реактором БН-600 // Атомная энергия, т. 25, вып. 5, 1965.
9. *Моторов Б.И., Моторова Э.В., Митенков Ф.М.* О моделировании активной зоны водо-водяного реактора с переменным числом кипящих каналов // Инженерно-физический журнал, т. 16, № 4, 1969.
10. *Моторов Б.И., Романов И.Н., Митенков Ф.М.* К анализу гидродинамических колебаний кипящего канала // Известия Академии наук БССР. Серия физико-энергетических наук, № 2, 1969.

11. Митенков Ф.М., Кондратьев Б.С. Исследование методом Монте-Карло угловых энергетических распределений рассеянного гамма-излучения // Сборник докладов конференции стран-членов СЭВ «Проблемы защиты от проникающих излучения реакторных установок», т. III, Мелекес, 1969 г.
12. Митенков Ф.М., Даниловский В.С. О температурной коррекции расхода теплоносителя в ядерных реакторах // Сборник «Управление энергетическими установками», МИФИ, вып. 2, 1967 г.
13. Митенков Ф.М., Будов В.М., Жучков И.И. и др. Конструкция реактора БН-600 и опыт экспериментальной отработки отдельных узлов // Советско-американский семинар «Опыт и проблемы строительства и эксплуатации реакторов на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем», 1967 г.
14. Митенков Ф.М., Усынин Г.Б., Шibaев В.А. и др. Некоторые вопросы оптимизации топливного цикла быстрых реакторов // Научно-техническая конференция «Атомная энергетика, топливные циклы, радиационное материаловедение». Ульяновск, 5–10 сентября 1970 г.
15. Лейпунский А.И., Казачковский О.Д., Митенков Ф.М. и др. Опыт проектирования и эксплуатации быстрых реакторов в СССР // Атомная энергия, т. 31, вып. 4., 1971 г.
16. Митенков Ф.М., Мовшевич З.М., Пологих Б.Г. и др. Новая атомная установка ледокола «Ленин» // Четвертая международная конференция ООН по мирному использованию атомной энергии. Женева, Швейцария, сентябрь 1971 г.
17. Митенков Ф.М., Лейпунский А.И., Казачковский О.Д. и др. Опыт проектирования и эксплуатации быстрых реакторов в СССР // Четвертая международная конференция ООН по использованию атомной энергии в мирных целях. Женева, Швейцария, сентябрь 1971 г. Доклад P/750.
18. Митенков Ф.М., Черномордик Е.Н., Кошкин Ю.Н. и др. Опыт создания насосов энергетических установок с реакторами БН-350 и БОР-60 // Научно-технический семинар «Обмен накопленным опытом по созданию и освоению установок с быстрыми реакторами на основе реактора БОР-60». Димитровград, 25–28 октября 1972 г.
19. Митенков Ф.М., Пахомов В.В., Ширяев В.И. и др. Опыт пуско-наладочных работ и энергопуска реактора БН-350 // «Состояние и перспективы работ по созданию АЭС с реакторами на быстрых нейтронах», 2-й симпозиум стран-членов СЭВ по быстрым реакторам. Обнинск, 1–5 октября 1973 г.
20. Митенков Ф.М., Кочетков Л.А., Орлов В.В. и др. Некоторые результаты исследований и опыта пуска АЭС с реактором БН-350 // Конференция «Атомные электростанции с реакторами на быстрых нейтронах». Лондон, 11–15 марта 1974 г.
21. Митенков Ф.М., Кошкин Ю.Н., Новинский Э.Г. и др. Циркуляционные насосы для АЭС с кипящими реакторами большой мощности // Конференция «Насосы для атомных электростанций. Бат, Англия, 22–25 апреля 1974 г.

22. *Митенков Ф.М., Костин В.И., Кошкин Ю.Н. и др.* Насосы энергетических установок с реакторами БН-350 и БОР-60 // Конференция «Насосы для атомных электростанций. Бат, Англия, 22–25 апреля 1974 г.
23. *Митенков Ф.М., Моторов Б.И.* Устойчивость нелинейной модели свободной конвекции // М., ЦНИИАтоминформ, Сборник «Вопросы атомной науки и техники». Серия «Динамика ядерных энергетических установок», вып. 1 (7), 1975 г. с.32-36.
24. *Митенков Ф.М., Будов В.М., Кошкин Ю.Н. и др.* Натриевые насосы для реакторов БОР-60, БН-350 и БН-600 // Международная конференция и ярмарка «Нуклекс-75», Швейцария, 1975 г.
25. *Митенков Ф.М., Пахомов В.В., Будов В.М. и др.* Ядерный реактор БН-600 – установка для энергетики близкого будущего // Международная конференция и ярмарка «Нуклекс-75», Швейцария, 1975 г.
26. *Митенков Ф.М., Маковский А.А., Кусмарцев Е.В. и др.* Конструктивные меры обеспечения безопасности быстрых реакторов с натриевым теплоносителем // Советско-американский семинар «Инженерные вопросы обеспечения безопасности ядерных энергетических установок с реакторами на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем». США, декабрь 1975 г.
27. *Митенков Ф.М., Пологих Б.Г., Следзюк А.К. и др.* Ледокол «Арктика» – новое достижение советского судостроения // Атомная энергия, т. 39, вып. 3, 1975, с. 163–165.
28. *Митенков Ф.М., Маковский А.А., Пахомов В.В., Ширяев В.И.* Сравнительный анализ компоновочных и конструктивных решений реакторов БН-350 и БН-600 // Советско-французский семинар «Концепции общих компоновок реакторов, конструкции основного оборудования и вспомогательных систем». Франция, июнь 1976 г.
29. *Митенков Ф.М., Мовшевич З.М., Мельников Э.М. и др.* Атомная установка ледокола «Арктика» // Судостроение, № 1, 1977 г., с. 32–34.
30. *Митенков Ф.М., Меркулов В.И., Пахомов В.В. и др.* Эксперименты по вскипанию натрия на реакторе БОР-60 // Советско-французский семинар «Общие принципы и технические решения обеспечения безопасности быстрых реакторов». Обнинск, декабрь 1977 г.
31. *Митенков Ф.М., Меркулов В., Пахомов В.В. и др.* Эксперименты по вскипанию натрия на реакторе БОР-60 // Атомная энергия, т. 45, вып. 5, 1978 г.
32. *Митенков Ф.М., Агалаков А.С., Бабин В.А. и др.* Опыт эксплуатации главных циркуляционных насосов на АЭС с реакторами РБМ-К-1000 // Совещание на Курской АЭС «Опыт проектирования, эксплуатации и наладки АЭС с канальными реакторами и перспективы их развития», июнь 1978 г.
33. *Митенков Ф.М., Самойлов О.Б., Комаров Е.В. и др.* Атомная энерго-технологическая установка ВГ-400. Возможные конструкции активной зоны // Атомная энергия, т. 47, № 2, 1979 г., с. 79.

34. Митенков Ф.М., Кууль В.С., Маламуд В.А. и др. Схемные вопросы реакторной установки атомной станции теплоснабжения и вопросы безопасности // Совещание специалистов СССР и Франции по теме «Атомные станции теплоснабжения», 1978 г.
35. Митенков Ф.М., Коваленко В.К., Мельников Э.М. и др. Ядерные паропроизводящие установки атомных ледоколов и опыт их эксплуатации // Европейская ядерная конференция «Nuclex-79», ФРГ, май 1979 г.
36. Митенков Ф.М., Сивков Р.А. К вопросу об анализе экспериментов по измерению эффектов реактивности на критических сборках // Депонированная рукопись, ВИМИ, 1979 г.
37. Митенков Ф.М., Ширяев В.И., Самойлов О.Б. и др. Опыт работы реактора БН-350 и его значение для последующих проектов // Сборник «Вопросы атомной науки и техники». Серия: «Физика и техника ядерных реакторов», I (I), 1979 г.
38. Митенков Ф.М., Егоров В.В., Кууль В.С. и др. Аварийные ситуации в реакторной установке атомной станции теплоснабжения // Советско-французский семинар по атомным станциям теплоснабжения, Москва, 1979 г.
39. Митенков Ф.М., Карасев В.Н., Меркулов В.И. и др. Результаты стендовых исследований акустического метода диагностики кипения // Советско-французское совещание «Ознакомление с внереакторными и внутриреакторными исследованиями кипения натрия и расчетными моделями. Изучение возможностей взаимной обработки экспериментальных результатов». Франция, 1979 г.
40. Митенков Ф.М., Субботин В.И., Боришанский В. и др. Теплогидравлические расчеты теплообменников с неравномерным расходом теплоносителя // Атомная энергия, т. 47, № 5, 1979 г., с. 318.
41. Митенков Ф.М., Ковалевич О.М., Егоров В.В. и др. Вопросы обеспечения безопасности атомных станций теплоснабжения // Атомная энергия, т. 48, вып. 4, 1980 г.
42. Митенков Ф.М., Дорофеев А.М., Кошкин Ю.Н. и др. Прототипная атомная высокотемпературная установка ВГ-400 для использования в энерготехнологическом производстве // Семинар МАГАТЭ по применению ВТГР для энерготехнологических целей. ФРГ, Юлих, 1980 г.
43. Митенков Ф.М., Хлопкин Н.С., Пологих Б.Г. и др. 20 лет атомному ледоколу «Ленин» // Атомная энергия, т. 48, № 4, 1980 г., с. 216.
44. Митенков Ф.М., Малышев В.М., Кочетков Л.А. и др. Опыт пусконаладочных работ и основные результаты начального периода эксплуатации установки БН-600 // Советско-французское совещание по обмену опытом эксплуатации быстрых реакторов. Франция, 1980 г.
45. Митенков Ф.М., Зверева Л.А., Моторов Б.И. и др. О применении предохранительных клапанов в I контуре ЯЭУ с водо-водяными реакторами (ВВЭР) // Атомная энергия, т. 50, № 5, 1981 г., с. 308.

46. *Митенков Ф.М., Кошкин Ю.Н., Самойлов О.Б. и др.* Атомная высокотемпературная установка ВГ-400 для использования в энерготехнологическом производстве // Семинар «Атомно-водородная энергетика и технология», ИАЭ, 1981 г.
47. *Митенков Ф.М., Кууль В.С., Самойлов О.Б.* Тепловые и гидравлические характеристики реактора атомной станции теплоснабжения // Советско-французский семинар «Физические и теплофизические исследования, разработка оборудования, технические средства обеспечения безопасности, технико-экономического обоснования АСТ». Франция, 1981 г.
48. *Митенков Ф.М., Дорофеев А.М., Кошкин Ю.Н. и др.* Прототипная атомная высокотемпературная установка ВГ-400 для использования в энерготехнологическом производстве // Международное совещание специалистов по газоохлаждаемым реакторам. Минск, 1981 г. / Известия АН БССР. Серия физико-энергетических наук, 1982 г., № 3, с. 54–61.
49. *Митенков Ф.М., Самойлов О.Б., Кутын Л.Н. и др.* О гидродинамической устойчивости естественной циркуляции в ЯЭУ с подкипением теплоносителя // Атомная энергия, т. 52, вып. 4, 1982 г., с. 227.
50. *Митенков Ф.М., Кошкин Ю.Н., Комаров Е.В. и др.* Атомная энерготехнологическая установка ВГ-400. Особенности схемы и конструкции // Международная конференция по газоохлаждаемым реакторам. Великобритания, Бристоль, 1982 г.
51. *Митенков Ф.М., Малышев В.М., Стекольников В.В. и др.* Опыт пусконаладочных работ и результаты эксплуатации Белоярской АЭС // Конференция МАГАТЭ по атомной энергетике. Австрия, Вена, 1982 г.
52. *Митенков Ф.М., Казачковский О.Д., Невский В.П. и др.* Развитие и опыт эксплуатации реакторов на быстрых нейтронах в СССР // Конференция МАГАТЭ по атомной энергетике. Австрия, Вена, 1982 г.
53. *Митенков Ф.М., Никопорец Ю.Г., Егоров В.В. и др.* Перспективы развития и обеспечение безопасности атомных станций теплоснабжения // Конференция МАГАТЭ по атомной энергетике. Австрия, Вена, 1982 г.
54. *Митенков Ф.М., Ширяев В.И., Пахомов В.В. и др.* Развитие конструкций быстрых энергетических реакторов в СССР // Советско-французский семинар «Выбор и обоснование проектно-конструкторских решений по установкам БН-1600 и Супер-Феникс-2». Франция, 1982 г.
55. *Митенков Ф.М., Бышев Ю.Ф., Кирюшин А.И. и др.* Экспериментальные исследования движения шаровых твэлов в активной зоне реактора ВГ-400 // Сборник ВАНТ. Серия «Атомно-водородная энергетика и технология», 1985 г., № 1.
56. *Митенков Ф.М., Комаров Е.В., Панов Ю.К. и др.* Высокотемпературный промежуточный теплообменник для установки ВГ-400 // Совещание МАГАТЭ «Система и компоненты передачи тепла ВТГР». Дюссельдорф, ФРГ, 1984 г.

57. Митенков Ф.М., Любимый А.Г., Булыгин В.В. и др. Атомная энерготехнологическая установка ВГ-400. Обоснование схемных решений // Семинар «Атомно-водородная энергетика и технология». Москва, ИАЭ, 1984 г.
58. Митенков Ф.М., Бабин В.А., Новинский Э.Г. и др. Предупреждение кавитационной эрозии проточных частей натриевых насосов // Семинар МАГАТЭ «Явление скрытой кавитации в натриевых насосах». ФРГ, октябрь, 1985 г.
59. Митенков Ф.М., Самойлов О.Б., Маламуд В.А. и др. Реакторная установка атомной станции теплоснабжения АСТ-500 // Атомная энергия, т. 58, вып. 5, 1985 г.
60. Митенков Ф.М., Егоров В.В., Кууль В.С. и др. Конструкция и обеспечение безопасности реакторной установки атомной станции теплоснабжения АСТ-500 // Рабочая группа МАГАТЭ по водоохлаждаемым реакторам повышенной безопасности, Международная конференция по показателям и безопасности в ядерной энергетике. Вена, Австрия, 1987 г.
61. Митенков Ф.М., Васильева В.В., Востоков А. и др. Некоторые возможности повышения надежности и работоспособности ЯЭУ при использовании ЭВМ в системах управления // Атомная энергия, т. 66, вып. 6, 1989 г.
62. Митенков Ф.М., Вахрамов Н.А., Новинский Э.Г. Исследование осевых подшипников скольжения на водяной смазке // Тяжелое машиностроение, 1990 г., № 7, с. 7–10.
63. Митенков Ф.М., Самойлов О.Б. Реакторная установка повышенной безопасности для теплоснабжения городов // Труды международной конференции американского Ядерного Общества. США, 1988 г.
64. Митенков Ф.М., Егоров В.В., Самойлов О.Б. и др. Реализация принципов пассивной безопасности в реакторной установке АСТ-500 // Семинар МАГАТЭ по пассивным принципам безопасности. Вена, Австрия, 1989 г.
65. Митенков Ф.М. Атомные станции теплоснабжения – новый этап в развитии атомных станций в СССР // Теплоэнергетика, 1990 г., № 8.
66. Митенков Ф.М., Жуков В.В., Кайдалов В.Б. и др. Критерии образования течи и разрушения сосудов давления применительно к реакторам АСТ // Международная конференция «Высококачественная и экономичная работа атомных станций». США, 1990 г.
67. Митенков Ф.М., Авербах Б.А. Вероятностный анализ безопасности АЭУ. Роль и его место в практике проектирования // Атомная энергия, 1992 г., т. 72, вып. 4, с. 337.
68. Митенков Ф.М., Кирюшин А.И., Кузавков Н.Г. и др. БН-800 – современная реакторная установка для ЮУАС // Энергетическое строительство, 1992 г.
69. Митенков Ф.М., Кууль В.С., Самойлов О.Б. и др. Концепция и проектные решения реакторов нового поколения // Атомная энергия, 1993 г., т. 74, вып. 4, с. 290.

70. Митенков Ф.М., Востоков В.С., Дрожжин В.Н. и др. Экономическая эффективность АЭС малой мощности // Атомная энергия, 1993 г., т. 75, вып. 5.
71. Решетников Ф.Г., Митенков Ф.М., Троянов М.Ф. Состояние и перспективы разработки в СССР радиационно-стойких конструкционных материалов для активной зоны быстрых реакторов // Атомная энергия, 1991 г., т. 70, вып. 2, с. 104–107.
72. Митенков Ф.М., Антоновский Г.М., Кац В.А. и др. Реактор ВПБЭР-600 с пассивными системами безопасности для АЭС нового поколения // Энергетическое строительство, 1993 г., № 12, с. 31–35.
73. Митенков Ф.М., Самойлов О.Б., Будылин Б.В. и др. Интегральный реактор ВПБЭР-600 для атомных станций нового поколения // МАГАТЭ, Вена, 1993 г.
74. Митенков Ф.М., Ардабьевский А.А., Васюков В.И. и др. Ядерная паропроизводящая установка повышенной безопасности типа КЛТ-40 // Энергетическое строительство, 1993 г., № 5, с. 16–21.
75. Митенков Ф.М., Бабин В.А., Иванов С.М. и др. Вертикальный секционный парогенератор ПГВС-1000 // Энергетическое строительство, 1993 г., № 5, с. 12–16.
76. Митенков Ф.М., Панов Ю.К., Самойлов О.Б. Реакторные установки малой мощности типа АБВ // Энергетическое строительство, 1993 г., № 5, с. 21–27.
77. Митенков Ф.М., Самойлов О.Б., Антоновский Г.М., Пономарев-Степной Н.Н. Реакторная установка ВПБЭР-600 для атомных станций нового поколения // Энергетическое строительство, 1993 г., № 12, с. 31–35.
78. Митенков Ф.М., Самойлов О.Б., Морозов О.А. Реакторная установка малой мощности АБВ-6. Технический комитет МАГАТЭ, Обнинск, 1994 г.
79. Митенков Ф.М., Булыгин В.В., Кодочигов Н.Г. Высокотемпературный газоохлаждаемый реактор – экологически чистый и безопасный энергоисточник для комплексного энергообеспечения промышленных объектов // Энергетическое строительство, 1994 г., № 1, с. 39–41.
80. Митенков Ф.М., Ардабьевский А.А., Васюков В.И. и др. Перспективы применения РУ повышенной безопасности типа КЛТ-40 в качестве автономных источников энергоснабжения // Новые промышленные технологии, 1994 г., № 6, с. 35–45.
81. Митенков Ф.М. Перспективы использования корабельных реакторных установок // Атомная энергия, 1994 г., т. 76, вып. 4, с. 318–326.
82. Митенков Ф.М., Городов Г.Ф. Определение и обоснование остаточного ресурса машиностроительных конструкций при долговременной эксплуатации // Проблемы машиностроения и надежности, 1995 г.
83. Митенков Ф.М., Меркулов В.И., Пичков С.Н. и др. Разработка средств контроля и диагностики оборудования ЯЭУ // Приборы и системы управления, 1995 г., № 11, с. 7–12.

84. Митенков Ф.М., Кураченко А.В., Маламуд В.А. и др. Атомные энергоблоки нового поколения. Концепция интегральных реакторов типа ВВЭР // Семинар МАГАТЭ, Обнинск, 1995 г.
85. Митенков Ф.М., Гуреева Л.В., Егоров В.В. и др. УВР-1200 – энергоблок большой мощности нового поколения // Атомная энергия, 1995 г., т. 78, вып. 4, с. 277–280.
86. Митенков Ф.М., Самойлов О.Б., Друмов В.В. и др. Основные концептуальные положения по созданию АСУ применительно к энергоблоку с РУ ВПБЭР-600 // ВАНТ. Серия «Физика ядерных реакторов», 1996 г., № 3, с. 18–26.
87. Митенков Ф.М., Кирюшин А.И., Синельник С.И. и др. Ядерная энергетическая установка повышенной безопасности с реактором на быстрых нейтронах БН-800 // Международный семинар, Актау, 1996 г.
88. Митенков Ф.М., Пономарев-Степной Н.Н. Перспективы развития ядерной энергетики в России // Атомная энергия, 1996 г., т. 81, вып. 3, с. 163–170.
89. Митенков Ф.М., Коваленко В.К., Игнатенко Е.И. и др. Атомная электростанция с плавучими энергетическими блоками для отдаленных и развивающихся районов // Nuclear Engineering International, May 1997, Vol. 42, № 514, pp. 28–31.
90. Митенков Ф.М., Полуничев В.И., Зверев К.В. Ядерные плавучие энергоопреснительные комплексы на базе реакторной установки КЛТ-40 // Семинар МАГАТЭ, Вена, 1997 г.
91. Митенков Ф.М., Аксенов Е.И., Вавилкин В.Н. и др. Приоритетные задачи снятия с эксплуатации и утилизации атомных подводных лодок // Атомная энергия, 1997 г., т. 82, вып. 2, с. 146–149.
92. Митенков Ф.М., Антоновский Г.М., Рунов Е.И. АЭС нового поколения средней мощности с реакторами пассивной безопасности ВПБЭР-600 // Nuclear Engineering and Design, 1997, Vol. 173, Nos. 1–3, pp. 95–108.
93. Митенков Ф.М., Полуничев В.И. АТЭС малой мощности и энергоопреснительные комплексы на основе судовых реакторных установок // Nuclear Engineering and Design, 1997, Vol. 173, Nos. 1–3, pp. 183–191.
94. Митенков Ф.М., Панов Ю.К., Полуничев В.И. и др. Установка реакторная КЛТ-40 для плавучего блока атомной теплоцентрали // Российско-индонезийский семинар по атомным технологиям, 1997 г.
95. Митенков Ф.М., Пономарев-Степной Н.Н. О перспективах развития атомной энергетики России // Экономика, техника, экология, 1997 г., № 2.
96. Митенков Ф.М., Беляев В.М., Антоновский Г.М. Опыт создания и эксплуатации оборудования РУ ОК-550 // Конференция «ТЖМТ и ядерные технологии». Обнинск, 1998 г.
97. Митенков Ф.М., Полуничев В.И. Атомные теплоэлектроцентрали малой мощности на базе судовых реакторных установок // Nuclear Engineering International, 1998 г.

98. *Митенков Ф.М., Антоновский Г.М.* Атомная станция средней мощности нового поколения с реакторной установкой ВПБЭР-600 // Nuclear Engineering International, 1998 г.
99. *Митенков Ф.М., Камашев Б.М.* Новый тип компактных пластинчатых теплообменников // Химическое и нефтяное машиностроение, 1998 г., № 12, с. 3–5.
100. *Митенков Ф.М., Макаров В.И., Полуничев В.И. и др.* Опыт создания и эксплуатации реакторных установок гражданских судов // Атомная энергия, 2000 г., т. 89, вып. 3, с. 179–189.
101. *Митенков Ф.М., Полуничев В.И.* Перспективы использования водородных реакторов малой мощности // Рабочая группа МАГАТЭ, Вена, 2000 г.
102. *Митенков Ф.М., Городов Г.Ф., Коротких Ю.Г.* Оценка надежности и безопасности, выработанного и остаточного ресурса конструктивных узлов // Международная конференция по прочности, Туапсе, 2000 г.
103. *Митенков Ф.М., Городов Г.Ф., Панов В.А.* Динамика трубопроводных систем при сейсмических воздействиях // Международная конференция по прочности, Туапсе, 2000 г.
104. *Митенков Ф.М., Панов Ю.К., Полуничев В.И. и др.* Результаты эксплуатации реакторных установок атомных судов // Международная конференция «МОРИНТЕХ-2001», Санкт-Петербург, 2001 г.
105. *Митенков Ф.М., Кодочигов Н.Г., Моторов Б.И. и др.* О методике испытаний модели вертикального ротора с электромагнитными подшипниками и переносе результатов испытаний на натуру // Проблемы машиностроения и надежности машин, 2001 г., № 2, с. 93.
106. *Митенков Ф.М., Городов Г.Ф., Коротких Ю.Г. и др.* Проблемы обеспечения надежности, ресурса и безопасности ЯЭУ и их решения на базе эксплуатационного мониторингового ресурса // Проблемы машиностроения и надежности машин, 2002 г., № 2, с. 106–113.
107. *Митенков Ф.М., Кирюшин А.И., Антоновский Г.М.* Реакторы типа ВВЭР разработки ОКБМ // Nuclear News, March 2002, pp. 33–35.
108. *Митенков Ф.М.* Перспективы развития ядерной энергетики России // Атомная энергия, том 92, вып. 1, 2002 г., с. 3–7.
109. *Митенков Ф.М.* Перспективы развития быстрых реакторов-размножителей // Атомная энергия, том 92, вып. 6, 2002 г.
110. *Митенков Ф.М.* Состояние и будущее судовой ядерной энергетики в России // Вестник Российской академии наук. – 2003. – Т. 73. – № 6. – С. 488–493.

Воспоминания коллег

Выдающийся Ученый и Гражданин

Ф.Г.Решетников, академик РАН,ВНИИНМ им. А.А. Бочвара

В Министерстве Российской Федерации по атомной энергии, больше чем в любом другом министерстве, работают выдающиеся ученые – члены Российской академии наук, доктора и кандидаты наук, другие научные сотрудники. Огромная заслуга в создании такого могучего научного потенциала отрасли принадлежит выдающемуся государственному деятелю двадцатого века Ефиму Павловичу Славскому. Благодаря ему наука расцвела не только в отраслевых институтах и конструкторских бюро, но и на заводах и комбинатах, где были созданы великолепные Центральные научно-исследовательские лаборатории, в которых трудились многие сотни ученых различного ранга и которые в сотрудничестве с коллективами многих институтов и конструкторских организаций решали важные задачи своих предприятий.

Е.П.Славский также внимательно следил за выборами в Академию наук СССР и оказывал реальную поддержку многим ученым отрасли. Он с гордостью иногда говаривал: «У меня в Министерстве своя Академия». И был, безусловно, прав.

Одним из тех, кого Е.П.Славский активно поддерживал на выборах в Академию наук СССР, был и Федор Михайлович Митенков: в 1979 г. он был избран член-корреспондентом, а в 1990 г. – академиком.

С Федором Михайловичем я познакомился вскоре после его назначения директором и генеральным конструктором ОКБМ. В то время я, как заместитель директора ВНИИНМ, уже входил в состав НТС Министерства. Но настоящее и близкое знакомство состоялось значительно позже, когда в 1977 г. я был назначен первым заместителем директора института и научным руководителем в отрасли по ядерному топливу, конструкционным материалам для активных зон ядерных реакторов АЭС и твэлам в целом и председателем Координационного совета по этим вопросам. Мне ярко не запомнилась первая целевая встреча с Федором Михайловичем, и в этом «виновата» манера его

поведения. В общении он очень мягок и, я бы сказал, деликатен, хотя, как потом оказалось, ему не чужды эмоциональные всплески, когда он отстаивает свою позицию по важным принципиальным научным вопросам. Несколько позже я на этом еще остановлюсь.

Встречи наши стали достаточно регулярными – на совещаниях, на НТС Министерства, на конференциях. Неоднократно я бывал в ОКБМ. В этих встречах участвовали многие замечательные специалисты ОКБМ, в том числе заместители директора В.И.Ширяев и О.Б.Самойлов. Запомнился приятный вечер, проведенный вместе с О.Б.Самойловым в доме Федора Михайловича.

С удовлетворением констатирую полное совпадение взглядов по обсуждавшимся вопросам. В какой-то степени это отражает и наша общая статья «Состояние и перспективы разработки в СССР радиационно-стойких конструкционных материалов для активной зоны быстрых реакторов», опубликованная в журнале «Атомная энергия» (февраль 1991 г., авторы Решетников Ф.Г., Митенков Ф.М., Троянов М.Ф.).

Обсуждавшиеся нами вопросы относились преимущественно к тематике быстрых реакторов начиная с БН-350. Но вскоре внимание было сосредоточено на БН-600. Это был головной промышленный реактор на быстрых нейтронах, основные характеристики которого – надежность, стабильность в работе, характер экологического воздействия на окружающую среду, экономические показатели – должны были определить место реакторов на быстрых нейтронах в атомной энергетике будущего.

Дело в том, что не только для БН-350, но и значительно позже для БН-600 мы не располагали достаточно радиационно-стойкими сталями для оболочек твэлов и шестигранников ТВС, которые могли бы обеспечить достаточно приличное выгорание топлива, не говоря уже о высоком выгорании. Это явилось причиной разгерметизации твэлов на начальном этапе эксплуатации БН-350, а затем и БН-600, хотя и при несколько более высоком выгорании топлива. Тогда при активной поддержке ОКБМ и ФЭИ нами была составлена и согласована с ведущими организациями и утверждена у руководства Министерства Первая целевая комплексная программа разработки радиационно-стойких сталей для оболочек твэлов и чехлов ТВС. В ее выполнении участвовало около десяти организаций. Руководство работами по Программе было возложено на автора этих строк. Программой были предусмотрены разработка и всесторонние исследования сразу десяти сталей разных классов и сплавов. Эта Программа была успешно выполнена, что и было констатировано в октябре 1987 г. на заседании секции № 4 НТС Министерства, которой руководил

Л.Д.Рябев. Три из десяти изучавшихся сталей были рекомендованы для промышленного использования. Все они были разработаны во ВНИИНМ.

Так удачно получилось, что к этому времени ОКБМ и ФЭИ закончили корректировку проекта активной зоны БН-600. Все это вместе позволило вскоре повысить выгорание топлива в БН-600 с 7 до 10 % и практически исключить преждевременную разгерметизацию твэлов. В настоящее время завершается формирование новой активной зоны, рассчитанной на выгорание 11,2 %. Ныне реактор БН-600 по стабильности и надежности работы, по экологическому воздействию на окружающую среду относится к одному из лучших реакторов в мире. И это оценка не только российских, но и зарубежных специалистов. Как свидетельствует академик Г.А. Месяц, в книге «О нашей науке. Мечты и реальность» ученые США, ФРГ, Японии, Китая, посетившие БАЭС еще в 1990 г., «по целому ряду параметров оценили ее как одну из лучших в мире».

А вот некоторые официальные данные. Выброс радиоактивных нуклидов в трубу составляет менее 0,5 % от допустимого количества. Средний радиационный фон на БАЭС постоянно держится на отметке 6–7 мкР/ч.

Ф.М. Митенков относится к числу тех ученых, которые еще в конце шестидесятых – начале семидесятых годов по достоинству оценили роль и место реакторов на быстрых нейтронах в атомной энергетике будущего. То были годы, когда наша атомная энергетика по-настоящему становилась на ноги, опираясь на базовый реактор на тепловых нейтронах – ВВЭР-1000. Тогда основные научные и финансовые возможности были направлены на решение этой задачи. И тем не менее Ф.М. Митенков своим авторитетом и аргументацией убедил руководство Министерства, а через него и Правительство страны в необходимости развития работ по разработке и строительству новых более совершенных реакторов на быстрых нейтронах.

В результате этих усилий в 1983 г. состоялось постановление Правительства №101-1 о строительстве четырех энергоблоков БН-800, из них три энергоблока на Южно-Уральской АЭС (ПО «Маяк») и один – на БАЭС. Началась подготовка строительных площадок. Мне довелось побывать на обеих площадках. Но с развалом Советского Союза строительство этих реакторов было прекращено.

В конце 90-х годов усилиями руководства Минатома, концерна «Росэнергоатом» и БАЭС при поддержке руководства Свердловской области строительство БН-800 на БАЭС было возобновлено. Предполагается, что сооружение этого реактора будет завершено в 2009 г.

Примечательна и очень значима такая деталь. В отличие практически от всех регионов России, население Екатеринбурга и области, оценивая высокую надежность и стабильность работы БАЭС и практически отсутствие негативного воздействия БН-600 на экологическую обстановку вокруг АЭС, поддержало строительство реактора БН-800. Разумеется, в проекте БН-800 использованы технические решения, оправдавшие себя в БН-600. Но, наверное, еще важнее то, что авторы проекта реактора и АЭС в целом видят реальные большие возможности технико-экономической оптимизации энергоблоков на быстрых нейтронах. Представляется возможным существенно уменьшить затраты за счет уменьшения металлоемкости на 25 %, а по одному из вариантов – даже более 50 %. Имеются резервы уменьшения эксплуатационных затрат. Очевидное улучшение технико-экономических показателей может быть достигнуто за счет оптимизации топливного цикла и в первую очередь за счет повышения выгорания топлива. Все это позволит сблизить технико-экономические показатели блоков БН-800 и ВВЭР-1000, а может быть и превзойти ВВЭР-1000.

Такой видит перспективу использования реакторов на быстрых нейтронах в атомной энергетике России академик Ф.М. Митенков. И можно полагать, что, руководствуясь этими соображениями, еще до начала подготовки строительных площадок для энергоблоков БН-800 коллективы ОКБМ под руководством Ф.М. Митенкова и ФЭИ начали разработку проекта существенно более мощного реактора БН-1600. Тогда, признаться, не все, в том числе и автор этих строк, сразу с пониманием восприняли этот очень серьезный шаг, казавшийся преждевременным и недостаточно обоснованным. Однако и на сей раз опыт и правильная оценка возможного пути развития атомной энергетике не подвели ученого. Да, в то время этот проект не был реализован, как не были реализованы и многие другие проекты. Но сейчас он «реанимируется» и в ближайшее время вполне может быть востребован. Дело в том, что в настоящее время в странах с развитой и развивающейся атомной энергетикой все больше внимания уделяется реакторам большой мощности. Эта тенденция уже нашла четкое отражение и в перспективе развития атомной энергетике России. В соответствии с приказом Министра № 337 от 20 июня 2004 г. начата разработка базового проекта отечественной АЭС большой мощности с реакторной установкой ВВЭР-1500. Более конкретно этот вопрос обсуждался на коллегии Минатома 14 января 2004 г. Так что проект БН-1600 вполне может быть реализован.

Помимо научных заслуг особо заслуживает быть отмеченной высокая гражданская позиция или ответственность Федора Михайловича,

когда он отстаивает свою точку зрения по важным и принципиальным научным вопросам, определяющим развитие какого-то направления отрасли. При этом его не смущает, кто и какого ранга являются его оппоненты или кто им лоббирует. В таких случаях обычная мягкая и деликатная манера дискуссии уступает место жесткой и принципиальной позиции. Вспоминаются две такие яркие дискуссии.

В Минске при очень солидной поддержке нашего Министерства и лично Е.П.Славского был создан и хорошо оснащен Институт ядерной физики, который возглавлял энергичный и симпатичный человек В.Б.Нестеренко. Я был в этом институте и близко познакомился с его директором. В.Б.Нестеренко воспытал идеей создания ядерного реактора, в котором в качестве теплоносителя использовался бы диссоциирующий газ. Изюминка этого предложения заключается в том, что этот же газ предполагалось использовать и в качестве рабочего газа турбины, то есть создать одноконтурный реактор. Заманчиво. В.Б. Нестеренко вдохновенно демонстрировал термодинамические расчеты, якобы подтверждавшие правильность и перспективность его идеи. Некоторых она заинтересовала. Во всяком случае, Ефима Павловича В.Б. Нестеренко этой идеей увлек и получил солидную финансовую поддержку для ее реализации. В Минском институте были сооружены или были близки к завершению строительства, если не ошибаюсь, две демонстрационные передвижные установки. Пришло время вынести этот вопрос на обсуждение научной общественности. Совещание проводил Е.П. Славский. Доклад В.Б. Нестеренко, помнится, начал обсуждаться не очень активно. Многим этот вопрос был недостаточно понятен, а аргументация докладчика была недостаточно убедительна. Вместе с тем было известно, что эту работу очень поддерживает Е.П.Славский. И вот выступает Ф.М. Митенков. Уже после нескольких фраз его выступление приобрело достаточно эмоциональный характер. Он раскритиковал и отверг идею создания реактора с диссоциирующим газом, назвав эту идею чуть ли не абсурдной. Основным недостатком этого проекта – сложная и весьма дорогостоящая система очистки диссоциирующегося газа от продуктов его распада. Я не мог предположить, что Федор Михайлович может так резко негативно оценить работу, поддерживаемую лично министром, зная, насколько дружественные и уважительные отношения были между ними. Но Федор Михайлович, похоже, руководствуется другим принципом: «Платон, ты мне друг, но истина дороже». Он не любит кривить душой, и свою позицию обозначает четко и твердо, независимо от того, кто ему оппонирует.

Видно было, что выступление Ф.М. Митенкова огорчило Е.П. Славского, но ни в какую полемику он не вступил. Я не знаю, было ли принято какое-то решение по обсуждавшемуся вопросу, но работа над реактором с диссоциирующимися газами вскоре была прекращена.

Нечто подобное повторилось много лет спустя, когда НИКИЭТ, активно поддерживаемый бывшим в то время министром Е.О. Адамовым, начал форсированно вести работы по разработке проекта принципиально нового реактора на быстрых нейтронах со свинцовым теплоносителем и нитридным топливом, да еще с пристанционным радиохимическим заводом для переработки отработавшего топлива (проект БРЕСТ).

Ситуация, достаточно похожая на только что описанную: новый реактор и личная поддержка Министра, но только более открытая и, я бы сказал, демонстративная. Многие решения, предлагавшиеся в этом проекте, были подвергнуты серьезной критике видных ученых. Так было, в частности, при обсуждении этого проекта на совместном заседании бюро Отделения физико-технических проблем энергетики и бюро Научного совета по атомной энергетике Российской академии наук 10 июня 1998 г., в котором принял участие и Ф.М. Митенков, первым выступивший в дискуссии. Он отметил сложность предлагаемого проекта и отсутствие минимально необходимых данных для начала разработки проекта и обоснования возможности его реализации. Эту точку зрения поддержали практически все присутствовавшие члены Академии.

Более подробно и аргументированно свое отношение к проекту БРЕСТ Ф.М. Митенков изложил в журнале «Атомная энергия» (июнь 2002 г.).

2 апреля 2004 г. Ф.М. Митенков выступил перед большой аудиторией на семинаре в Курчатовском институте с докладом «Состояние и перспектива использования реакторов БН и реакторов малой мощности». В докладе он не касался проекта БРЕСТ. Но один из сотрудников НИКИЭТ, по-видимому, сторонник БРЕСТ, попросил докладчика высказать свое отношение к этому реактору. Последовал аргументированный отрицательный ответ. И здесь произошло совершенно неожиданное – аудитория встретила ответ аплодисментами. Вот уж поистине «Глас народа – глас божий».

Автор этих строк полностью разделяет мнение академика Ф.М.Митенкова о реакторе БРЕСТ, а свою позицию конкретно о перспективе использования нитридного топлива изложил на двух семинарах – в Курчатовском институте и во ВНИИНМ (в присутствии авторов проекта БРЕСТ) и в журнале «Атомная энергия» (декабрь 2001 г.). О разработке какого проекта может быть речь,

если до сих пор ни один твэл (не говоря уже о тепловыделяющей сборке) с нитридным топливом не испытан в условиях предполагаемого режима эксплуатации БРЕСТ со свинцовым теплоносителем или БН-800, в котором авторы БРЕСТ так настойчиво рекомендуют использовать также нитридное топливо.

Эпизоды истории разработки двух столь разных реакторов я привел лишь для того, чтобы на этих примерах показать гражданскую позицию выдающегося ученого, когда обсуждаются важные научно-технические вопросы отрасли и когда он имеет свою принципиально иную точку зрения и отстаивает ее независимо от того, кто выступает в качестве его оппонента. Мне импонирует такая позиция, хотя позволить себе такое могут немногие.

Разумеется, научная деятельность Ф.М. Митенкова не ограничивается только тематикой реакторов на быстрых нейтронах. Он внес значительный вклад в разработку и создание ядерных реакторов для гражданского и военно-морского флота и целого ряда других ядерно-энергетических установок. Но об этом, наверное, расскажут другие, более близко сотрудничающие с ним по этой тематике. А я расскажу еще об одной встрече с Федором Михайловичем и о проделанной нами вместе с другими коллегами из Академии наук важной работе по поручению президентов России и Академии наук.

В соответствии с подписанным соглашением между США и Россией о существенном сокращении ядерных вооружений предполагалось, что Россия изымет из ядерного арсенала около 50 т плутония (по последним данным, если не ошибаюсь, около 35 т). Соответствующее количество плутония должны изъять и США. А далее возник довольно серьезный спор — что делать с этим избыточным для вооружения плутонием. Американцы настаивали на одном — уничтожить плутоний, то есть перевести его в такую форму, которая не позволила бы использовать плутоний ни для изготовления зарядов, ни для изготовления ядерного топлива. Россия с этим твердо не соглашалась. И тогда президенты России и США договорились о создании двух комиссий независимых экспертов — ученых для выработки предложений по этому вопросу. Российскую комиссию возглавил Е.П. Велихов. В ее состав вошли Н.Н. Пономарев-Степной, Ф.М. Митенков, Ф.Г. Решетников, А.А. Макаров. Американскую комиссию возглавил известный физик-ядерщик, иностранный член РАН В. Пановски. Состав российской комиссии утвердили Президент РАН Ю.С.Осипов и наш министр В.Н. Михайлов.

После нескольких встреч в Москве и Вашингтоне было принято наше предложение, суть которого заключается в следующем. Плутоний — это замечательное ядерное топливо, которое успешно может

быть использовано в реакторах и на быстрых, и на тепловых нейтронах. Так плутоний и должен быть использован. Это и было зафиксировано в заключительном отчете двух комиссий, подписанном в марте 1997 г. При этом Россия согласилась на международный контроль хранения плутония. Для этого на ПО «Маяк» к настоящему времени уже построено при финансовой поддержке США уникальное хранилище, способное выдержать семибалльное землетрясение, попадание обычных бомб или снарядов и пр. Так что теперь Ф.М.Митенкову необходимо прилагать еще большие усилия, чтобы реакторы на быстрых нейтронах скорее заняли достойное место в атомной энергетике России, а топлива для них уже достаточно, наверное, не менее чем на столетие даже без включения в топливный цикл природного урана. А необходимого для получения уран-плутониевого топлива обедненного урана у нас накопилось огромное количество.

В ходе переговоров мы быстро поняли, что американцы испытывают нас «на прочность». Когда они почувствовали твердость нашей позиции, они с ней быстро согласились. И что примечательно – вскоре сенат США официально принял решение о таком же использовании высвобождающегося военного плутония.

В замечательной плеяде выдающихся ученых России и, в частности, Минатома Ф.М.Митенков остается одной из ярких фигур. Он продолжает плодотворно трудиться в качестве научного руководителя прославленного Опытного Конструкторского Бюро Машиностроения им. И.И.Африкантова.

Я присоединяюсь к многочисленным поздравлениям Федора Михайловича и желаю ему крепкого здоровья, новых творческих успехов и благополучия ему и всей его семье. К сожалению, мне ни разу не довелось поздравить своего тезку лично ни с одним юбилеем, потому что... мы родились в один день – 25 ноября, но я – ровно на пять лет раньше. Желаю Федору Михайловичу догнать и перегнать меня!

О Главном конструкторе реакторов БН

*М. Ф. Троянов,
доктор технических наук, профессор ГНЦ РФ «ФЭИ»*

В далеком 1960 году, когда началось проектирование быстрого реактора БН-350 в качестве одного из источников энергоснабжения г. Шевченко (ныне г. Актау в Казахстане), начались и многолетние связи Физико-энергетического института и нынешнего ОКБ машиностроения. Ранее выполненные проработки реактора, делавшиеся в ФЭИ и ЦНИИ-58, были переданы в ОКБ Завода № 92, теперь ОКБМ, а на начальника ОКБ И.И. Африкантова были возложены обязанности Главного конструктора реактора при научном руководстве ФЭИ и конкретно А.И. Лейпунского.

С того времени начались контакты сотрудников обеих организаций, с того времени мы и узнали Федора Михайловича Митенкова либо уже бывшего, либо вскоре ставшего начальником расчетного отдела.

Отчетливо помню такую картину первых лет нашего сотрудничества: огромная комната с тремя или четырьмя рядами столов, с сидящими в затылок друг другу сотрудниками расчетного отдела и Федора Михайловича, сидящего лицом ко всем. К нему подходят, тихонько что-то обсуждают, потом отходят на свое место.

Новая работа внесла в ОКБМ до того времени неизвестные там научные направления: физику реакторов на быстрых нейтронах и технологию натриевого теплоносителя со всеми сопутствующими особенностями выбора технологических и конструктивных схем, выбора материалов и т. п. Очень интенсивно проходила в это время передача знаний и опыта, имевшихся в ФЭИ, и расчетчики ОКБМ и конструктора во главе с Владимиром Ивановичем Ширяевым вникали во все советы, данные экспериментов и расчетов, рекомендации и сведения из литературы, осваивали их творчески и глубоко.

Федор Михайлович очень скоро стал прекрасно разбираться в специфике нового дела, а вскоре мы увидели, как в его отделе появ-

ляется все больше специалистов, бывших недавно молодыми выпускниками Горьковского университета и Политехнического института, прекрасно разбирающимися в нашем общем деле.

При выполнении эскизного и технических проектов БН-350 ФЭИ проводил расчетно-физические обоснования, но уже в следующем проекте (БН-600) те же обоснования выполнялись совместно, либо сотрудниками ОКБМ самостоятельно.

Несомненна заслуга Федора Михайловича в том, что в ОКБМ воспиталась и выросла плеяда образованных, творческих, самостоятельных физиков-расчетчиков. Их особенностью является повседневная совместная работа с конструкторами, с конкретными проектами. В то же время сотрудничество физиков ОКБМ и ФЭИ всегда позволяло тщательно продумать и отработать новые предложения и идеи, касающиеся физики реактора, порой в спорах и дискуссиях найти оптимальные решения.

Федор Михайлович привлек к работе с нами таких своих специалистов, как: О.Б. Самойлов, Г.Б. Усынин, А.И. Кирюшин, Б.А. Васильев, Н.Г. Кузавков, В.И. Евсеев и многих других, всех назвать невозможно.

Многих из них готовил Политехнический институт, где Федор Михайлович заведовал кафедрой, переданной потом своему ученику — Г.Б. Усынину.

Многие ученики Федора Михайловича стали кандидатами и докторами наук, защитившими диссертации либо в Совете ГПИ, возглавлявшимся Федором Михайловичем, либо в других Советах. Но и многие сотрудники ФЭИ защитили свои диссертации в Совете ГПИ, немало докторов наук из ФЭИ были и остаются членами Совета при ГПИ (теперь НГТУ).

Как-то в разговоре, в котором я участвовал, и где речь шла о кадрах (вернее, о конкретном «кадре») Федор Михайлович сказал, что один из его принципов заключается в том, чтобы работать с теми и такими людьми, какие есть в организации. Но то, что он очень заботился о поступлении в ОКБМ способной, талантливой молодежи, и то, что ему удалось привлечь и вырастить из этой молодежи достойную смену первому поколению конструкторов и расчетчиков, достойно большого уважения.

Попадая в коллектив ОКБМ, молодые специалисты не только быстро приобретают квалификацию, они быстро впитывают в себя некий особый дух этой организации. Может быть, этот дух или стиль жизни ОКБМ возник и давно, но мне довелось работать с этой организацией более всего тогда, когда ею руководил Федор Михайлович, и я видел, как именно от него исходит пример высокой организованности, ответственности, строго отношения к делу. Четкая организация всего дела, деловитость и конкретность и, повторяю, ответственность — все это всегда чувствовалось на всех уровнях взаимодействия. Конечно, сама роль конструкторской организации требует строгости мышления,

ответственности и дисциплины ума и поведения, но невозможно отрицать во всем этом роль первого лица.

При пусках и освоении реакторов БН-350 и БН-600, конечно же, выявлялись различные неудачные решения или недоделки, избежать этого в новом деле нельзя. И уже когда Федор Михайлович рассмотрел возникшую неприятность, то далее следовало оперативное разбирательство, отбор и проверка решения, часто с экспериментальной отработкой на стендах. Один пример для меня был наиболее впечатляющим.

В конце 1972 года, когда проводились пусконаладочные работы на реакторе БН-350, проверялась работа обратных клапанов на петлях первого контура. Оказалось, что резкое закрытие обратного клапана при остановке насоса вызывает гидравлический удар, при котором огромные трубопроводы диаметрами 500 и 600 мм смещаются с грохотом на своих опорах с устрашающими отклонениями. Казалось, что сейчас где-то лопнет одна из огромных труб. Конечно, это исключало нормальную работу контуров.

В считанные недели был проведен анализ, сделана конструкторская переработка, проверена на стенде новая конструкция. Я думаю, что это был блестящий пример доработки конструкции и организации работ, обеспеченные Федором Михайловичем и его заместителями в то время Евгением Наумовичем Черномордиком и Юрием Николаевичем Кошкиным.

К 1979 году первый отечественный быстрый реактор БР-5 в ФЭИ по многим показателям выработал свой ресурс и для продолжения его эксплуатации была необходима реконструкция с заменой корпуса, в котором размещается активная зона. Но к этому времени уже не существовала организация, которая конструировала этот реактор. Обратились к Федору Михайловичу. Он, рассмотрев эту трудную ситуацию, несмотря на большую загруженность ОКБМ и понимая важность работы БР-5 для развития техники быстрых реакторов, взял на ОКБМ задачу этой реконструкции. Были не только переработаны старые чертежи, но и в опытном производстве ОКБМ были изготовлены новый корпус, внутрикорпусные устройства и др. В 1983 году возрожденный реактор, получивший название БР-10 снова вошел в строй с увеличенной мощностью и проработал до полной остановки почти 20 лет. Спустя много лет, я уверен, что не возьмись тогда Федор Михайлович решить эту задачу силами ОКБМ, мы просто в ФЭИ не смогли бы продлить жизнь этому первенцу быстрых реакторов в нашей стране.

Часто, бывая в ОКБМ, приходилось слышать о занятиях «руководящего ядра» в спортзале. Посещение занятий физкультурой не только поощрялось, но и вменялось в обязанности руководителям разного уровня. Об этом часто шли разговоры и на общих обедах в столовой. Во время обедов позволялось беседовать о чем угодно, кроме работы.

Естественно, что о занятиях в спортзале и о «прогульщиках» говорить разрешалось. Федор Михайлович своим примером всячески поощрял физкультурные занятия своих сотрудников.

Как-то в сентябре мы оказались одновременно в санатории «Южное взморье» в Адлере. Был отличный сезон для купания. Федор Михайлович в пловцовских доспехах входил в море и надолго-надолго исчезал со своего топчана. Можно было некоторое время разглядеть его шапочку, перемещавшуюся от буйка до буйка — по самой границе дозволенного расстояния от берега. Немногие там делали такие заплывы. Его дистанцию я постепенно освоил, но его темп был для меня невыполним.

В конце ноября 1989 года мне довелось быть в составе делегации Ядерного общества СССР, выезжавшей в США для участия в осенней конференции Американского ядерного общества. Нашу делегацию, состоявшую из представителей различных организаций, возглавлял Федор Михайлович.

К этому времени уже стали открытыми и факт существования ОКБМ, и имя его руководителя, и основные направления разработок. К нашей делегации и к Федору Михайловичу был проявлен огромный интерес и максимальное внимание. Конференция проходила в Сан-Франциско. В первый же день делегацию приняли председатель Ядерного общества и его помощники. Руководители различных фирм, институтов использовали все резервы свободного времени нашей делегации, чтобы заполнить их встречами, знакомствами, какими-то обсуждениями. И, конечно, в центре их интереса был до того незнакомый им Генеральный конструктор судовых ядерных установок, быстрых реакторов, атомных станций теплоснабжения и других ЯЭУ. Когда гостеприимные хозяева хотели показать нам достопримечательности Сан-Франциско, председатель *ANS* г-н Ловенстайн лично руководил этой экскурсией. Когда мы выразили желание побывать на фирме «Дженерал Электрик» в Сан-Хосе и в Брукхэйвенской лаборатории, находящейся вблизи Нью-Йорка, — все это было организовано.

Кончилась конференция, мы поехали в Сан-Хосе на фирму «Дженерал Электрик», там нас познакомили с разработками реакторов *BWR* и *PRISM*, и к вечеру мы вернулись в отель. Однако перед отъездом в Сан-Хосе мы не забрали в оргкомитете билеты на самолет Аэрофлота от Нью-Йорка до Москвы. А пока мы катались в Сан-Хосе, оргкомитет из отеля, где базировалась вся конференция, выехал в свою штаб-квартиру под Чикаго, и где теперь наши билеты, неизвестно. Надежда была на то, что представитель оргкомитета Майкл будет нас отправлять из Сан-Франциско до Нью-Йорка, и что билеты у него. Но, когда мы встретились с ним в аэропорту Сан-Франциско, у него были только билеты до Нью-Йорка. Но Майкл заверил нас, что послезавтра, когда вы будете в Брукхэйвенской лаборатории, он организует нам переправку билетов федеральной экспресс-почтой из

штаб-квартиры *ANS* в Лабораторию, убеждая нас, что все будет в порядке. Много часов после этого мы видели нашего главу делегации озабоченным и побледневшим. Да и для всех нас воскресный день в Нью-Йорке и полдня в *BNL* проходили «под печатью» волнения и беспокойства. Руководители *BNL* поручили контролировать все точки, куда могла приехать почта, а у нас напряжение нарастало и нарастало. Все разрешилось примерно за час до крайнего срока выезда в аэропорт. Если бы билеты не привезли, мы бы ехали в аэропорт без билетов. Но Майкл и экспресс-почта США оказались на высоте.

Правда, судьба приготовила нам еще один акт расплаты за эту интересную поездку. Вместо плановой промежуточной посадки в Шенноне нас из-за плохой погоды посадили в Дублине, где самолеты Аэрофлота не садятся. Сменный экипаж должен был из Шеннона ехать в Дублин, видимо, была и куча других неувязок. Так что сидели мы там много часов. Перебеседовали на все серьезные темы, вспомнили все известные каждому анекдоты, ребусы и загадки. Могу быть довольным тем, что мне удалось разгадать письменную загадку Федора Михайловича. Много раз я ее тоже загадывал своим друзьям и знакомым, чаще всего сталкивался с ответом: «сдаюсь». Но, думаю, за несколько часов сиденья в зале аэропорта, наверное, догадались бы.

Став президентом нашего Ядерного общества, Федор Михайлович организовывал и проводил очередную конференцию Общества в Нижнем Новгороде. ОКБМ к тому времени полновесно включился в международное сотрудничество и всей своей мощью и организованностью обеспечил высокий уровень представительства участников, проведения заседаний, дискуссий и отдыха. Большая часть и иностранных, и отечественных участников из Москвы до Нижнего Новгорода плыли на теплоходе. На борту теплохода были лекции и обсуждения. Были и бардовские песни, которыми заслушивались многие иностранцы, подчас даже не понимая смысла. А потом — ранее недоступный для иностранцев город и многие часы контактов со специалистами легендарной организации ОКБМ. Разве может такое событие оставить равнодушными наших зарубежных коллег?

И вот Федор Михайлович накануне своего 80-летия. Совсем недавно, как мне кажется, ему было 60, когда и я приезжал в ОКБМ с поздравлениями от ФЭИ. Просто невероятное количество событий вместились в эти 20 лет — и «вселенского» масштаба, и в личных судьбах каждого.

Талант Федора Михайловича распределился между разными делами и направлениями. Одно из них наиболее дорого для многих сотрудников ФЭИ и, конечно, наших коллег из других организаций. Это — быстрые натриевые реакторы и самое существенное достижение — создание и 24 года успешной работы реактора БН-600. На основе БН-600 — большой и многообещающий задел. Продолжение следует.

Ф.М. Митенков и ОКБМ

*Б.П. Папковский,
доктор технических наук,
в 1962–1998 гг. возглавлял
в Минатоме Управление по разработке
и созданию корабельных и судовых АЭУ*

В связи с предстоящим юбилеем мне, как достаточно хорошо знавшему Ф.М. Митенкова в течение более 40 лет, есть что вспомнить и осветить некоторые обстоятельства, касающиеся его роли и деятельности, главным образом в области разработки и создания отечественных судовых реакторных установок.

Назначение на должность Начальника – Главного конструктора ОКБМ

Следует кратко напомнить о сложившейся в ОКБМ обстановке при вступлении Ф.М. Митенкова в конце 1969 г. в должность Начальника и Главного конструктора.

В это время ОКБМ (бывшее «ОКБ-92» Горьковского машзавода Миноборонпрома, выделенное в самостоятельное предприятие и с 1964 г. переведенное в систему Минсредмаша), возглавляемое основателем ОКБМ крупным конструктором и талантливым организатором И.И. Африкантовым, уже занимало в стране лидирующие позиции в новой, важной, сложной и быстроразвивающейся области работ – разработке атомных судовых установок для отечественных АПЛ и гражданских судов.

В стране по проектам и документации ОКБМ серийно изготавливались реакторные установки для АПЛ первого и второго поколений, строящихся на четырех судостроительных заводах, монтировалась на атомном ледоколе «Ленин» новая, более совершенная установка, сооружались в НИТИ два крупных уникальных наземных стенда как

прототипы перспективных судовых АЭУ, форсированно велись работы над реакторными установками для АПЛ третьего поколения и для нескольких объектов другого назначения (АПЛ проекта 705, атомный крейсер, лихтеровоз-контейнеровоз). Велись также большие работы в задел на перспективу по данной тематике.

В ОКБМ уже сформировался большой высококвалифицированный коллектив конструкторов, расчетчиков, экспериментаторов и исследователей, специализировавшихся на работах по судовым реакторным установкам. Переход ОКБМ в систему Минсредмаша позволил в короткие сроки и масштабно развить в ОКБМ собственные экспериментальную и стендовую базы и достаточно мощное опытное производство.

В ОКБМ по тематике «судовые реакторные установки» под руководством Главного конструктора И.И. Африкантова работали, возглавляя крупные подразделения или направления работ, его заместители – опытные конструкторы, специалисты по разработке реакторных систем и другого оборудования – Е.Н. Черномордик, Ю.Н. Кошкин, Н.М. Царев, В.И. Ширяев, Д.В. Каганов, Ф.М. Митенков, а также большое число высококвалифицированных сотрудников «среднего звена» – О.Б. Самойлов, Г.Ф. Носов, А.И. Кирюшин, И.В. Серов, П.П. Семин, В.И. Костин, В.И. Полуничев, М.В. Смирнов, З.М. Мовшевич, В.И. Званцев, С.И. Майзус, Н.Г. Сандлер, В.В. Булыгин, А.А. Беляев и др. (некоторые из них впоследствии заняли руководящие должности в ОКБМ).

Помимо большого объема конструкторских, расчетных и экспериментальных работ, проводимых непосредственно в ОКБМ, в круг обязанностей и задач ОКБМ также входили: авторское сопровождение изготавливаемого на ряде заводов оборудования реакторных установок, участие в монтаже, наладках и испытаниях указанных установок на строящихся АПЛ, атомных ледоколах и наземных стендах, работы по обеспечению эксплуатации созданных реакторных установок (сбор и анализ опыта, помощь эксплуатационному персоналу и службам ВМФ и Мурманского морского пароходства и т. п.).

Таким образом, к концу 60-х годов прошлого века ОКБМ представляло собой уже сложившуюся крупную конструкторскую организацию, с мощной стендово-экспериментальной базой и опытным производством, специализировавшуюся на выполнении в стране важнейших работ по разработке, созданию и эксплуатации корабельных и судовых реакторных установок. Эти работы, как относящиеся к приоритетным направлениям по обеспечению обороноспособности страны, естественно, требовали непрерывного и квалифицированного их ведения, оперативного и авторитетного решения возникающих

сложных текущих вопросов, а также организации работ и исследований на перспективу в этой области.

Поэтому неожиданная и преждевременная кончина И.И. Африкантова в июле 1969 г. (ему было менее 53 лет) потребовала срочного назначения в ОКБМ нового Начальника-Главного конструктора.

Это оказалось, однако, делом совсем непростым. Все понимали и считали логичным и естественным, чтобы новый Начальник и Главный конструктор ОКБМ был бы из числа ведущих сотрудников ОКБМ, являлся конструктором с большим опытом и пользовался высоким авторитетом как в коллективе ОКБМ, так и в организациях, тесно сотрудничавших с ОКБМ.

Этим качествам из числа заместителей И.И. Африкантова вполне соответствовал его первый заместитель Е.Н. Черномордик, длительное время работавший в ОКБМ, великолепный и опытный конструктор, уважаемый и заслуженный специалист и руководитель. Однако эта кандидатура по неписаным, но действовавшим в то время правилам, на должность первого лица в ОКБМ практически была непроходной (пресловутый пятый пункт анкеты). Мне думается, что Е.Н. Черномордик сам это отлично понимал и в данной ситуации проявлял заинтересованность только к тому, чтобы на указанную должность назначили достойного сотрудника ОКБМ.

Большинство других крупных конструкторов из числа заместителей И.И. Африкантова с необходимым опытом и авторитетом — Ю.Н. Кошкин, Н.М. Царев, А.М. Шаматов, В.И. Ширяев — по различным причинам (возраст, состояние здоровья, отсутствие необходимых организаторских данных и т. п.) не подходили для должности Начальника-Главного конструктора ОКБМ.

Что касается кандидатуры Ф.М. Митенкова, то положение выглядело также неоднозначно. С одной стороны — это был высокообразованный специалист (окончил университет и юридический институт, доктор технических наук, профессор), умеющий работать с людьми, волевой и требовательный, трудолюбивый и с отличной памятью, с безупречной деловой и личной репутацией, сравнительно молод (45 лет) и здоров. Но с другой стороны, и это настораживало, в своей предшествующей работе Ф.М. Митенков не имел необходимого опыта по ведению работ над крупными и сложными конструкторскими проектами и по руководству большой организацией, каковой являлось ОКБМ, причем, похоже, он не очень-то стремился к подобной деятельности. Имея склонность и интерес к научной работе и хорошо проявивший себя в этой области, Ф.М. Митенков, будучи заместителем И.И. Африкантова по науке, руководил подразделениями, обеспечивающими проведение в ОКБМ большого объема

расчетных и исследовательских работ, являясь в этих вопросах признанным и авторитетным руководителем.

Вместе с тем было известно, что И.И. Африкантов успел, как говорят, «положить глаз» на Ф.М. Митенкова, выделяя его среди своих заместителей, приобщая ко всему портфелю работ, ведущихся в ОКБМ, в том числе к конструкторским, и не скрывал, что видит в Ф.М. Митенкове своего будущего преемника, хотя, конечно, не думал, что это может произойти так скоро.

Я помню, что в отношении возможных кандидатур на должность Начальника-Главного конструктора ОКБМ и, в частности, о назначении на эту должность Ф.М. Митенкова, руководство Министерства и Оборонный отдел ЦК КПСС интересовались и моим мнением.

Свое суждение я тогда сформулировал примерно следующим образом: в сложившейся ситуации на должность Начальника-Главного конструктора ОКБМ следует при его согласии назначить Ф.М. Митенкова, но с условием, чтобы он в течение ближайших полутора–двух лет основательно «образовался» и освоился в конструкторских делах, проявив себя на деле как Главный конструктор, с тем чтобы в таком качестве он был воспринят в коллективе ОКБМ и на предприятиях, сотрудничающих с ОКБМ.

Данное условие мною обуславливалось тем, что именно в эти год–два предстояло завершение работ и проведение важных итоговых испытаний новых реакторных установок, разработанных ОКБМ для опытной АПЛ проекта 705 и для атомного ледокола «Ленин», и было важным увидеть, как поведет себя при этих событиях Главный конструктор ОКБМ.

В итоге с указанным «напутствием» в конце 1969 г. Ф.М. Митенков был назначен Начальником-Главным конструктором ОКБМ.

Начальный период в роли начальника ОКБМ, первые важные решения

Можно сказать, что Ф.М. Митенков достаточно быстро и похоже без заметных для себя проблем освоился с обязанностями руководителя сложного хозяйства ОКБМ и ведением в роли Главного конструктора большого числа важных ведущихся в то время в ОКБМ проектов и разработок.

Мне думается, что этому способствовали такие личные качества Ф.М. Митенкова, как умение учиться и осваивать новые для себя знания (прежде всего в конструировании сложнейших инженерных комплексов, каковыми являются судовые реакторные установки и атомные установки стационарной энергетики), быстро вникать в суть

сложных, требующих решения вопросов, уметь добиваться поставленных целей при уважительном отношении к возражениям и другим мнениям и брать на себя ответственность за принимаемые решения.

Следует отметить, что Ф.М. Митенкова всегда отличала четкость и аргументированность своей позиции по самым сложным вопросам, требующим определенности и ясности.

Я полагаю, что большую помощь в успешном и быстром вхождении Ф.М. Митенкова в свою новую роль сыграло также поведение его заместителей и многих опытных специалистов и конструкторов ОКБМ, которые доброжелательно, искренне и заинтересованно помогали ему во многих вопросах и делах.

Ф.М. Митенков не сдерживал инициативы в принятии самостоятельных решений своим заместителям, оставляя за собой право при необходимости поправить или даже отменить некоторые из них, но всегда при этом имея на этот счет свои убедительные доводы. Поэтому среди руководства ОКБМ практически сразу сложилась рабочая деловая и доверительная атмосфера.

Очень важно, что Ф.М. Митенков сумел сохранить сложившиеся еще при И.И. Африкантове тесные производственные связи с соседним Машиностроительным заводом по отработке технологий и при изготовлении узлов и оборудования, разрабатываемых в ОКБМ. Эти связи получили свое расширение и развитие вплоть до совместного проведения сдаточных испытаний многих поставляемых образцов, что одновременно положительно сказывалось и на повышении квалификации и профессионализма сотрудников ОКБМ.

Как специалист-ученый Ф.М. Митенков, понимая важность науки в формировании прогнозов и тенденций развития в областях техники по специализации ОКБМ, сам принимал определенные меры и ориентировал свой коллектив на поддержание и развитие тесных связей с такими ведущими научными институтами и центрами, как ИАЭ им. И.В. Курчатова, ФЭИ, ВНИИНМ, ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова, ЦНИИ «Прометей», Институт машиноведения, Нижегородский технический университет, ЦНИИ-1 МО и др. Лично у Ф.М. Митенкова быстро сложились нормальные деловые отношения с А.П. Александровым и А.И. Лейпунским и со многими научными сотрудниками и специалистами ИАЭ и ФЭИ по вопросам, касающимся как стратегической направленности развития и создания судовых реакторных установок и реакторов атомной энергетики, так и по многим возникающим сложным вопросам в ходе разработки и создания конкретных реакторных установок или систем и оборудования для них.

В 1970–1971 гг. в стране были завершены следующие важные проекты, имеющие общегосударственное значение:

- создание, длившееся более 10 лет, уникальной опытной АПЛ проекта 705 с атомной установкой ОК-550 (с реактором на ЖМТ), разработанной ОКБМ, и проведение испытаний этой установки в составе АПЛ;
- модернизация атомного ледокола «Ленин» с заменой на нем реакторной установки ОК-150 на разработанную ОКБМ более совершенную установку ОК-900 с принятием ледокола в эксплуатацию после успешных испытаний его с новой атомной установкой.

В этих важнейших событиях уже в полной мере проявилась роль Ф.М. Митенкова как Главного конструктора ОКБМ, что, кстати, подтвердило правильность принятого ранее решения о назначении его на эту должность.

Принципиально значимыми выводами Ф.М. Митенкова как Главного конструктора ОКБМ по итогам работ над указанными проектами реакторных установок являются следующие:

1. Несмотря на то, что вслед за опытной АПЛ проекта 705 было построено и достаточно успешно в составе ВМФ эксплуатировалось еще три серийных АПЛ проекта 705 с установками ОК-550, было решено, что впредь реакторные установки на ЖМТ для судовых объектов ОКБМ разрабатывать не будет, так как подобные установки по сравнению с установками водо-водяного типа сложнее по составу, значительно дороже в разработке и изготовлении и требуют специального базового обслуживания и обеспечения.

Такой вывод и решение основывались на обстоятельном сравнительном анализе, выполненном в ОКБМ по итогам разработки и создания нескольких установок с реакторами водо-водяного типа и установки с реактором на ЖМТ. Как показали следующие десятилетия, реакторные водо-водяные установки, разработанные ОКБМ для АПЛ третьего и четвертого поколений и для надводных кораблей, полностью отвечали постоянно ужесточавшимся требованиям заказчика к указанным установкам, и поэтому надобность в разработке альтернативных решений с применением реакторов с ЖМТ даже не возникала.

2. На всех гражданских атомных судах в предстоящие 3–4 десятилетия должна применяться созданная для атомного ледокола «Ленин» установка типа ОК-900 с унифицированным оборудованием и с различиями, обуславливаемыми только условиями привязки компоновки установки к конкретному судну.

Такая линия в последующем была строго выдержана при создании серии линейных двухреакторных и двух мелкосидящих

однореакторных атомных ледоколов и атомного лихтеровоза-контейнеровоза; это оказалось технически абсолютно правильным и дало стране огромный экономический эффект.

Основные свершения (1972–1979 гг.)

В течение 28 лет, когда ОКБМ возглавлял Ф.М. Митенков, под его непосредственным руководством как Главного конструктора только по судовой тематике были разработаны и доведены до реализации:

- атомные паропроизводящие установки типа ОК-650, примененные на всех АПЛ третьего поколения в одно- и двухреакторном исполнении;
- атомная паропроизводящая установка КН-3, примененная на созданных четырех крейсерах и в проекте атомного авианосца;
- атомные паропроизводящие установки типа ОК-900А и КЛТ-40 нескольких модификаций с унифицированным оборудованием, примененные на атомных ледоколах, атомном лихтеровозе-контейнеровозе и на специальном корабле ВМФ;
- по проектам ОКБМ и с его активным участием в НИТИ (Сосновый Бор) были сооружены три натурных стенда новых корабельных АЭУ (КВ-1, КМ-1, КВ-2) и проведены комплексные испытания и исследования этих стендов, давших неоценимую информацию для учета в эксплуатации АПЛ, на которых применялись указанные установки и для учета во вновь разрабатываемых проектах судовых АЭУ;
- были разработаны и созданы специальные комплексы оборудования для проведения перезарядок реакторов активными зонами для АПЛ трех поколений, крейсеров, ледоколов, а также создана ремонтная оснастка для оборудования реакторных установок указанных объектов.

В эти же годы были проведены имеющие исключительно важное значение работы:

- по повышению рабочего ресурса и времени эксплуатации всего оборудования и систем, входящих в состав реакторных установок, разработанных ОКБМ;
- по уменьшению виброшумовых характеристик механизмов и другого оборудования различных реакторных установок.

В обоих направлениях были достигнуты разительные достижения и успехи. Систематически также велись работы и были достигнуты большие положительные результаты по повышению надежности, живучести и безопасности корабельных реакторных установок, по совершенствованию их динамических характеристик и переходных

режимов, по повышению культуры производств и качества поставляемой продукции заводами, изготавливающими оборудование и системы для корабельных и судовых реакторных установок.

Собственно ОКБМ за время руководства этой организацией Ф.М. Митенковым разительно изменилось:

- расширены конструкторские подразделения;
- создан ряд специализированных лабораторий: физическая со стендами, теплофизики, тензометрии, акустики, прочности и вибраций, материаловедения и коррозии и др.;
- сооружены специальные стенды для проведения испытаний (включая испытания на ресурс) разрабатываемого оборудования реакторных установок: насосов, парогенераторов, теплообменников, механизмов СУЗ, арматуры, узлов, приборов и т. п. Сооружен уникальный стенд для виброударных испытаний различного оборудования;
- создан собственный вычислительный центр, осуществлена компьютеризация многих работ, исследований, рабочих мест, внедрено машинное конструирование.

В итоге ОКБМ сегодня способно самостоятельно, полностью и на современном уровне обосновывать, исследовать и проверять все новые схемные и конструктивные решения, закладываемые в разрабатываемые проекты. По масштабам и уровню научных работ и исследований, ведущихся в ОКБМ, по располагаемому кадровому потенциалу, в том числе сотрудников высшей квалификации (доктора и кандидаты наук, профессора, научные сотрудники, изобретатели), эта организация вполне соответствует статусу научно-конструкторского института.

Решающая роль в расширении ОКБМ и его возможностей, в том числе в научных исследованиях, в развитии экспериментальной базы и опытного производства ОКБМ, безусловно, принадлежала Ф.М. Митенкову.

С введением в 1988 г. в системе Минсредмаша звания «Генеральный конструктор по атомной энергетике» в числе первых этого звания был удостоен Ф.М. Митенков. Рядом с ним в качестве его заместителей становятся и активно работают проявившие себя в крупных проектах такие ведущие специалисты, как О.Б. Самойлов, Г.Ф. Носов, Ю.К. Панов, Р.М. Крылов, А.И. Кирюшин, В.И. Костин, а также руководители целого ряда лабораторий, отделов, бюро, участков.

Следует особо отметить заслуженный и исключительно высокий авторитет Ф.М. Митенкова как Главного конструктора корабельных и судовых реакторных установок, имевшийся у руководства Минсредмаша, Минсудпрома, Миноборонпрома и ВМФ, у Главных

и Генеральных конструкторов АПЛ, у руководителей большого числа НИИ, КБ и заводов различных ведомств.

О масштабах и важности ведущихся в ОКБМ работ свидетельствовали факты ознакомительных посещений ОКБМ высшим руководством страны (Н.С. Хрушев, Л.И. Брежнев, Ю.В. Андропов, Д.Ф. Устинов) и деловых посещений ОКБМ руководством ВПК, ВМФ, ряда министерств, Госплана, работниками ЦК КПСС.

Достижения и успехи ОКБМ за годы руководства Ф.М. Митенкова были отмечены Орденом Октябрьской революции (1985 г.), ряд работ был отмечен Ленинской и Государственными премиями СССР; многие сотрудники были удостоены правительственных наград и почетных званий.

Практически регулярно Федор Михайлович принимал участие в партийно-хозяйственных активах Министерства, его выступления на этих собраниях всегда отличались четкими деловыми предложениями и поистине являли государственный подход к проблемам как по конкретной тематике работ ОКБМ, так и по задачам отрасли в целом.

Постоянное внимание уделялось Ф.М. Митенковым работе, возглавляемой академиком А.П. Александровым Межведомственной секции НТС при Минатоме по судовым атомным установкам. Выступления Ф.М. Митенкова (или по его поручениям сотрудников ОКБМ) всегда бывали очень четкими и содержательными, что позволяло выработать и принять оптимально правильные решения по зачастую сложнейшим обсуждаемым вопросам и способствовало поддержанию авторитета и значимости секции НТС как высшего межведомственного научного органа по данной тематике.

В современных условиях во вновь разрабатываемых проектах судовой АЭУ или стационарной АЭС определяющую роль (наряду с обеспечением безопасности, надежности, длительности эксплуатации, ресурса, ремонтпригодности и других технических показателей) будут играть вопросы технико-экономической оптимизации проекта объекта в целом. В этой связи очень характерно для Ф.М. Митенкова с самого начала панорамное видение предстоящей задачи во всей его полноте и комплексности.

Поэтому, приступая к разработке нового комплекса или системы (корабельная АЭУ или АЭС), Ф.М. Митенков всегда декларирует и придерживается следующего правила: необходима технико-экономическая оптимизация будущего проекта, причем как по всем составным частям, входящим в систему, по факторам, характерным для основных стадий (создание, эксплуатация и будущая утилизация), так и системы в целом во всех указанных стадиях; только подобный подход сулит и даст верную и объективную оценку проекта.

В подтверждение указанного подхода и правила Ф.М. Митенков неоднократно напоминал мудрое утверждение Аристотеля: «Целое всегда больше, чем сумма его составных частей».

Интересно отметить обстоятельства ухода Ф.М. Митенкова с поста Начальника-Главного конструктора ОКБМ. И хотя ему уже было тогда 73 года, его уход не был следствием резкого ухудшения его здоровья или каких-то крупных неудач в деятельности ОКБМ или несработанности с начальством. Мне помнится, что он лично инициировал свой уход со своего поста, мотивируя это тем, что он поработал достаточно долго (28 лет), что для нового времени нужны новые люди с новыми идеями и подходами и нельзя связывать дальнейшую судьбу ОКБМ только с авторитетом и заслугами руководителя. Мне думается, что это был акт высокой его принципиальности как крупного специалиста и незаурядности личности.

Уйдя со своего поста, Ф.М. Митенков остался в составе ОКБМ как мудрый, многоопытный научный руководитель, охотно делящийся своим опытом, знаниями и советами как с новыми руководителями ОКБМ, так и с большим числом сотрудников различных подразделений.

В связи с несколько грустным юбилеем Ф.М. Митенкова (все же отмечается 80 лет, а не 50 и даже не 60), хочется пожелать ему творческого долголетия, добавить к истории ОКБМ еще несколько славных страниц своего участия в роли мудрого наставника, не болеть и всяческого благополучия его родным и близким.

Выдающийся конструктор и ученый

Н.С.Хлопкин

Академик РАН, РНЦ «Курчатовский институт»

Я знал и работал в очень тесном контакте с Федором Михайловичем более 45 лет по морским ядерным энергетическим установкам. Работать с ним всегда было приятно. Работали всегда в связке, стараясь взаимно помочь друг другу: он в понимании конструкций оборудования, сотрудники Курчатовского института – в понимании реакторной физики. И вместе – бились над решением неординарных вопросов, возникающих и в процессах проектирования, и ввода реакторных установок в действие и сопровождения эксплуатации. Границ в своей деятельности не устанавливали. Часто сотрудники ОКБМ, в особенности расчетного отдела КБ, заходили в наш «огород», разрабатывая и рассчитывая физику новых активных зон. Иногда и мы принимали участие в решении конструкторских задач, например, по материалам парогенераторов и динамике переходных процессов. Особенно этому делу способствовал Анатолий Петрович Александров, научный руководитель и духовный отец атомного флота страны.

Сотрудников Курчатовского института он учил видеть инженерные проблемы конструкций, знать не только физику, но и технику, разбираться в чертежах и схемах, детально знать оборудование реакторной установки. А сотрудников КБ вовлекал в углубленное понимание вопросов физики реакторов. Он добился создания в ОКБМ критических стендов, на которых отрабатывались вопросы физики активных зон и ядерной безопасности, хотя в Курчатовском институте таких стендов было предостаточно. А.П.Александров считал, что объединение теоретической, расчетной, экспериментальной и конструкторской деятельности очень важно для решения задач в неизбежно сжатые сроки и на высоком уровне.

Здесь я коснусь лишь деятельности Федора Михайловича в области морских ядерных энергетических установок, вернее даже части

этой деятельности, чтобы на ее примере характеризовать стиль работы Федора Михайловича, его подход к решению крупных задач в очень сложных условиях и с их вечной срочностью. По долгу службы, являясь заместителем А.П.Александрова по морским ядерным энергетическим установкам, я работал в тесном контакте с Федором Михайловичем.

Это были работы по созданию реакторных установок для второго поколения подводных лодок. Одновременно шло становление конструкторского бюро и превращение заводского бюро в первоклассную проектно-конструкторскую организацию, способную комплексно решать самые разнообразные задачи реакторостроения.

Начато все это было под руководством Игоря Ивановича Африкантова, который на этих работах взрастил очень талантливого своего помощника, которому позднее пришлось их развивать и завершать.

Недавно я обнаружил, что деятельность в области морских ядерных энергетических установок была для Федора Михайловича, может быть, и не главной, хотя и здесь он достиг выдающихся результатов, которые были отмечены присуждением ему Государственной премии и звания Героя социалистического труда. Но все-таки престижная международная премия «Глобальная энергия», присуждаемая «за выдающиеся теоретические, экспериментальные и прикладные исследования, разработки, изобретения и открытия в области энергии и энергетики», Федору Михайловичу была присуждена «за разработку физико-технических основ и создание энергетических реакторов на быстрых нейтронах».

Федор Михайлович в конструкторском бюро Горьковского машиностроительного завода начал заниматься морской атомной энергетикой в трудное для нее время. Уроки первых лет эксплуатации атомных подводных лодок были жестокими. Был накоплен большой ассортимент неприятностей. Атомные подводные лодки довольно часто возвращались на базу с вышедшим из строя оборудованием — парогенераторами, насосами, холодильниками, арматурой, электрооборудованием. В связи с этим командование Северного флота направило в адрес руководства ВМФ, правительства страны, ЦК КПСС ряд докладов о том, что ядерная энергетика подводных лодок очень сложна и на флоте применена преждевременно.

Для выяснения всех обстоятельств была создана специальная комиссия во главе с начальником Главного управления кораблестроения ВМФ вице-адмиралом Г.Ф. Козьминым. Слава богу, у квалифицированных специалистов этой комиссии указанные выше недостатки не заслонили перспектив применения атомной энергетики на морском флоте. Комиссия пришла к выводу, что надежность

ядерных энергетических установок может быть повышена и строительство атомных подводных лодок надо продолжать.

В условиях изнурительной гонки вооружений, во время трудного становления морской атомной энергетики конструкторское бюро Горьковского машиностроительного завода взялось за создание реакторов второго поколения для подводных лодок на основе новых решений с обязательствами повысить их надежность, безопасность и живучесть по сравнению с реакторами первого поколения.

Эти цели были весьма достойными, ради них стоило идти на неожиданный риск, ради них все сотрудники КБ работали с энтузиазмом и единением, понимая величайшую ответственность за порученное дело.

Федор Михайлович к этому времени стал начальником расчетного отдела КБ, которое научно обосновало характеристики новых реакторных установок. Они имели вместо петлевой компоновки с разветвленным первым контуром и арматурой больших диаметров – блочную компоновку, где реактор, парогенераторы и насосы первого контура соединялись в единый блок короткими патрубками. Блочная конструкция оказалась очень прогрессивной, получившей широкое распространение в морских ядерных энергетических установках.

С целью сокращения сроков решения поставленных задач КБ пошло на три очень смелых шага.

Первый шаг – создавать новые установки, существенно отличающиеся от предыдущих, без наземного прототипа. На сооружение стенда-прототипа, на проведение на нем испытаний, проверок работоспособности оборудования не хватало времени в складывающейся международной обстановке. Кстати, наземный стенд-прототип был все-таки построен – через 16 лет после ввода в действие головных подводных лодок с ядерными энергетическими установками второго поколения.

Второй шаг – однореакторное исполнение установки с целью снижения водоизмещения и стоимости подводной лодки. До сих пор на отечественных подводных лодках применялись лишь двухреакторные установки. Следовало найти соответствующие схемные решения, чтобы по надежности установки однореакторная подводная лодка практических не уступала бы двухреакторной.

Третий шаг – развертывание серийного производства, не дожидаясь результатов эксплуатации головных реакторных установок. Это была самая крупная на отечественном флоте серия унифицированных реакторов, примененная сразу на трех проектах атомных подводных лодок:

- проекта 670 с крылатыми ракетами;
- проекта 671 – многоцелевых;
- проекта 667 – стратегического назначения.

В этих условиях конструкторское бюро под руководством И.И.Африкантова и Ф.М.Митенкова, который в 1967 г. стал заместителем Игоря Ивановича по науке, а в 1969 г. — и руководителем КБ, приняло ряд решений, позволивших выйти КБ с честью из трудного положения и превратиться в крупную многопрофильную организацию с мощной экспериментальной производственно-технической и расчетной базой. Этому много способствовал выход КБ из состава ГМЗ и переход МСМ в 1963 г.

Важнейшую роль сыграло создание собственного опытного производства для изготовления образцов разрабатываемого оборудования и стендов для его испытания. Конечно, это опытное производство охватывало и другие работы КБ по реакторам с жидкометаллическим теплоносителем, применяемым в энергетических и лодочных реакторах, по реакторам для стационарной энергетики. Опытное производство имело решающее значение для выполнения всех этих задач. Вести раздельное проектирование некоторых видов оборудования силами сторонних организаций по техническим заданиям КБ не позволяли сроки и очень высокие требования к оборудованию. Все новые конструктивные решения бюро проходили предварительные испытания и отработку на стендах. Таких стендов за короткие сроки было создано более 200. Одновременно были созданы специальные подразделения: арматурное, парогенераторное, насосное, электрооборудования, приборов теплоконтроля и автоматики.

Вторым важным фактором было бурное развитие под руководством Ф.М.Митенкова расчетного отдела, занимающегося решением возникающих при проектировании вопросов физики реакторов, теплофизики, биологической защиты, анализом малоизученных эксплуатационных факторов, влияющих на конструкцию и работоспособность оборудования.

Отдел проводил расчетное обоснование проектов, разрабатывал программы экспериментов для создаваемых новых лабораторий — физической, теплогидравлической, трения и износа, электрических измерений, проблем прочности и критстендов, на которых обрабатывались активные зоны.

Третьим важным фактором была организация пополнения конструкторского бюро квалифицированными специалистами. По инициативе И.И.Африкантова при самом активном участии Ф.М.Митенкова в Горьковском Политехническом институте был создан физико-технический факультет, ставший вскоре основной базой подготовки кадров для КБ.

И, конечно, доброжелательная творческая атмосфера, создающая сплоченный коллектив, воодушевленный важностью решаемых

задач, влюбленный в атомную энергетику, одержимый страстью ее овладения. Ф.М.Митенков возглавляет конструкторское бюро ОКБМ с 1969 г. Он осуществляет проведение единой научно-технической политики на всех этапах создания ядерных энергетических установок. Основным принципом этой политики являлся комплексный подход к проектированию систем и оборудования со всесторонним теоретическим обоснованием конструктивных решений и представительными испытаниями оборудования в условиях, максимально приближенных к эксплуатационным, обязательным авторским сопровождением серийного производства и эксплуатации для дальнейшего совершенствования конструкций.

Сейчас ОКБМ – крупная многопрофильная организация с высококвалифицированным персоналом с мощной экспериментальной и производственной базой. Этой организации оказалось под силу создание ядерных энергетических установок с реакторами различного назначения.

Под руководством Ф.М.Митенкова ОКБМ создало реакторы для подводных лодок третьего и четвертого поколений, тяжелых атомных ракетных крейсеров, энергетические реакторы на быстрых нейтронах, завершило строительство реакторов для атомных ледоколов и со сплавом свинец-висмут для подводных лодок.

Ждут своего воплощения в металл разработанные ОКБМ проекты атомных станций теплоснабжения, малой энергетики, энерготехнологического назначения с высокими параметрами теплоносителя. Федор Михайлович не только руководил этими разработками, но и принимал в них непосредственное участие.

Приходится удивляться, как в процессе повседневных забот и рабочей суеты удалось Федору Михайловичу обобщить факты и события и написать несколько монографий, одновременно ведя большую преподавательскую работу в Нижегородском техническом институте.

За выдающиеся разработки реакторных установок и научные достижения первостепенного значения Федор Михайлович в 1990 году был избран действительным членом Российской Академии Наук по отделению механики и процессов управления. Я был выбран по отделению физико-математических проблем энергетики. Поэтому в Академии наук мы обычно встречались на общих собраниях, чтобы обсудить те или иные новости, детали тех или иных проектов. Его найти легко – надо идти к книжным киоскам, где весь перерыв он просматривает книги. То же он делает и в Нижнем Новгороде, заходя практически ежедневно после работы в неплохой книжный магазин, расположенный недалеко от его квартиры. Его рекомендации по приобретению книг безупречны.

Не меньшим увлечением для Федора Михайловича служат лыжи. Цель лыжных походов — за зиму на лыжах пройти путь, эквивалентный расстоянию от Нижнего Новгорода до Москвы и обратно. Может быть, в последние годы ему и не удалось достичь такой цели, но лыжи он любит беззаветно.

В дни командировок в ОКБМ с Федором Михайловичем встречаешься не только в его кабинете. На время обеда обычно получаешь приглашение в отдельную комнату, где собирается вся дирекция. Председательствует Федор Михайлович, однако здесь все равны. Непринужденная атмосфера — шутки, анекдоты, подначки, в том числе и в адрес приехавшего. Никаких производственных разговоров — за них полагается штраф, сколь ни велика была срочность вопроса. Провинившийся на следующий день должен поставить на стол бутылки, число и ценность которых определялись степенью провинности. Только здесь мнение председательствующего было решающим. Такой порядок выдержал разгул демократии, когда профсоюзные лидеры требовали, чтобы начальство обедало в гуще масс.

Я признателен Федору Михайловичу за его доступность, обязательность, неизменную доброжелательность на протяжении всего нашего с ним знакомства и работы над морскими реакторами с водой под давлением. Надеюсь, что и впредь Федор Михайлович будет служить верой и правдой расширению применения на море атомной энергетики, несмотря на увлеченность стационарными реакторами на быстрых нейтронах. Может быть, такого типа реакторы он выведет и в море.

Немного о Ф.М.Митенкове и быстрых реакторах

Л.А. Кочетков, ГНЦ РФ «ФЭИ»

Впервые я познакомился с Федором Михайловичем Митенковым в Соединенных Штатах Америки в 1965 г. Тогда мы оказались вместе в составе довольно большой (восемь человек) делегации, возглавляемой Анатолием Петровичем Александровым. Кроме меня в составе делегации от ФЭИ был еще М.С. Пинхасик, в то время начальник реактора БР-5. К моему удивлению, после того как я ознакомился с заданием, я узнал, что от ФЭИ присутствует в составе делегации еще один сотрудник – то ли старший инженер-физик, то ли старший научный сотрудник, точно не помню. Это и был Федор Михайлович Митенков.

В программе было посещение главной «штаб-квартиры» Аргоннской национальной лаборатории в Чикаго, посещение быстрого реактора «Энрико Ферми», посещение научно-технической базы АПЛ в Айдахо-Фоллс. После интересного посещения «Энрико Ферми» нас отправляют самолетом из Чикаго в Солт-Лейк-Сити, а оттуда автотранспортом до площадки Айдахо-Фоллс. Подъезжаем к охраняемой зоне, нас встречает огромный плакат: «Не мешайте размножаться быстрым реакторам!» Ну, да – здесь работают основные идеологи-энтузиасты быстрых реакторов США. Здесь под руководством Цинна сооружен первый в мире экспериментальный быстрый реактор *EBR-1*, здесь же сооружен и второй экспериментальный быстрый реактор *EBR-2*. День воскресный. Нас встречает директор местного научного центра, приглашает на обед. После его приветствия встает Анатолий Петрович, говорит, обращаясь к хозяевам: «А теперь трепещите – я буду говорить по-английски». Он, действительно, сказал несколько слов по-английски, а потом вытащил из кармана своих широченных штанин пол-литра «Столичной», попросил два стакана, налил их доверху и предложил директору выпить за советско-американскую дружбу – до дна за один прием.

На следующий день директор утром на работу не вышел. А у нас был рабочий день. На одном из натриевых стендов, на котором испытывалась конструкция обратного клапана физик-расчетчик из ФЭИ проявил неумный интерес: Федор Михайлович интересовался и деталями конструкции клапана, и требованиями к нему, и методикой испытаний. Много позднее я понял, что разработка обратного клапана для проекта БН-350 оказалась для ОКБМ совсем нетривиальной задачей, потребовавшей сложного расчетного обоснования, тщательной конструкторской разработки и экспериментальной отработки. Так что у Федора Михайловича был к этому испытательному стенду вполне объяснимый интерес, и он по-честному отработывал свои командировочные.

Вечером мы были приглашены в гости в семьи работающих в Айдахо-Фоллс сотрудников. Нас разделили по двое. Я попал в пару к Федору Михайловичу. Так мы вдвоем вечером оказались в гостях в семье мормонов. Кроме нас, в дом были приглашены знакомые хозяев. Выясняется, что это некий самостоятельный коллектив, члены которого по вечерам на посиделках учат русский язык. Более того, для желающих есть школа русского языка. Нас это и удивило и обрадовало — у меня в то время был примитивный английский (недавно сдал кандидатский минимум); дела с английским у Федора Михайловича обстояли не лучше, и мы были очень озабочены предстоящими способами общения с хозяевами. Так что известие об их семейном увлечении нас действительно обрадовало. Другая проблема состояла в определении подходящего подарка. Ну, шоколадные конфеты и известный напиток нам показались вполне подходящим вариантом. К тому же у Федора Михайловича нашлось что-то нижегородское, то ли «хохлома», то ли еще что-то. Однако с подарком нас ожидал небольшой «сюрприз». Не успели мы войти в дом, как хозяин дома нас предупредил, что они — мормоны из штата Юта и что на спиртное и табак у них табу. Мы с воодушевлением ответили, что не «такое» умеем переживать. Затем был «концерт» в нашу честь: хозяйка вместе со своими друзьями стали петь на русском языке «Вечерний звон». Мы подпевали. Потом была подана вареная картошка в мундире — фирменный продукт штата Юта. Картошка крупная, продолговатая. К картошке были поданы чайные ложки и масло в розетках. Оказывается, едят они картошку чайными ложками, как у нас иногда едят яйца, сваренные всмятку. С картошки и начался обмен мнениями о традициях в семейной жизни, детских садах, школах, вузах, о традиционном питании, о погоде и увлечениях. Федор Михайлович оказался замечательным рассказчиком, даже немножко актером. Я как мог помогал ему с

переводом. У меня и, кажется, у Федора Михайловича это был первый опыт общения с иностранцами в их доме и семье, наверное, нетипичной — попали-то в семью мормонов. Из-за неопытности, плохого владения английским расслабиться нам до конца встречи не удалось. Тем не менее мы были очень довольны представившейся возможностью побывать в американской семье. Покинув хозяев, активно обсуждали прошедшую встречу, стараясь выделить наиболее интересное из увиденного и услышанного. А для меня все это оказалось вдвойне интересным, так как я познакомился с будущим Главным конструктором быстрых реакторов с натриевым теплоносителем, с которым впоследствии мне посчастливилось регулярно встречаться и вместе работать над проектами быстрых реакторов.

Через несколько лет после этой встречи мне пришлось изменить тематику своей работы. По настоятельному предложению Виктора Владимировича Орлова и Александра Ильича Лейпунского я стал заниматься инженерными проблемами быстрых натриевых реакторов, и в связи с этим мне пришлось окунуться в ауру новой для меня конструкторской организации — ОКБМ. Как раз в это время Главным конструктором ОКБМ стал Федор Михайлович Митенков. Мне всегда трудно отделять личность Главного конструктора (да и любого руководителя) от руководимого им коллектива: как правило, руководитель — продукт коллектива, а коллектив — детище руководителя. Это как у В.В. Маяковского: «Мы говорим Ленин, подразумеваем — партия, мы говорим партия, подразумеваем — Ленин».

До знакомства с ОКБМ и его руководителем мне довелось сотрудничать с различными коллективами главных конструкторов реакторных установок: с НИКИЭТ (Н.А. Доллежал) — по проектам Первой в мире АЭС и по проектам первых двух блоков Белоярской АЭС; ОКБ Кировского завода (Н.М. Синев) — по проекту ТЭС-3; КБ Ленинградского Металлического завода (Н.В. Богданов и В.М. Абрамов) — по проекту Билибинской АТЭЦ. Да не обидятся на меня вышеупомянутые КБ и их руководители, хотя от общения с ленинградскими КБ у меня останутся самые теплые воспоминания, ОКБМ и его руководитель, Ф.М. Митенков, для меня были, есть и останутся самыми, самыми уважаемыми и любимыми. Мне все у них нравилось — «могучая кучка» опытнейших, высочайшей квалификации руководителей верхнего уровня и сонм талантливых, ищущих, изобретательных руководителей среднего звена, их «естественная» ответственность за дело, за безопасность установок, их энтузиазм и дисциплинированность, их внимательное, скрупулезное отношение к нашим отчетам и к нашим замечаниям на проектные материалы, их обычай разрабатывать несколько конкурентных вариантов трудных

конструктивных решений и совместно обсуждать их с нами, их постоянная забота об имидже своей организации, их ежедневное общение во главе с Федором Михайловичем за обедом, где можно было обсуждать любые новости кроме рабочей тематики, где допускалось незлобивое подтрунивание друг над другом, где шумно обсуждались их спортивные баталии в спортзале.

Что мне более всего импонирует в стиле работы Федора Михайловича Митенкова как Главного конструктора и руководимого им коллектива? Он пришел к творчеству конструктора от науки, сохранил к ней привязанность, неумную жадность к углубленному познанию решаемой задачи, что сохранилось у Федора Михайловича до сих пор. Он – сторонник комплексного обоснования конструкторских решений: его заботят и надежность, и безопасность, и экономичность, и технологичность, и красота конструкторских решений. Да, эти «заботы» противоречивы, тем интереснее для него искать оптимальное решение.

Стремление к следующему, новому и более трудному проекту – его стихия. Однако он – новатор с уклоном научного консерватизма и рационального материализма – со студенческой скамьи Федор Михайлович твердо усвоил, что сознание вторично. Поэтому всему новому – да, но с опорой на проверенный опыт. *Step by step* – все-таки лучше, чем «до основания, а затем...». Вот почему многократно выверенные, обсужденные, вымученные конструктивные решения важнейших компонент он с присущей ему настойчивостью проверяет на стендах, сооружаемых на своем предприятии. Вот почему погрешности расчета и эксперимента воплощаются им в проекте в виде соответствующего «запаса».

Для сравнения две картинки «из жизни». Мы (ФЭИ) долго доказывали Николаю Антоновичу и его коллегам, что мощность первого блока АМБ-100 МВт(э) и второго блока АМБ-200 МВт(э) – нереальны. Не уговорили – «Увидим при эксплуатации. В случае «чего» – поправим вместе с эксплуатационниками». После аварии с твэлами пришлось «поправлять». А вот я убеждаю Федора Михайловича, что в теплообменнике «натрий-натрий» БН-600 довольно большой запас в поверхности теплообменника и поскольку в парогенераторах тоже большой запас в поверхности теплообмена, то можно было бы подумать об увеличении мощности. Тоже ведь не согласился, но по другой причине: «Пусть установку, убедимся – эксплуатационники спасибо скажут».

И еще одна, может быть, самая главная черта Федора Михайловича – он не натягивает на себя тогу абсолютного, безгрешного жреца. Просто он знает, что нужно сделать все возможное, чтобы минимизировать неудачи, и умеет это делать. А когда, тем не менее,

выявляются в его детище какие-то огрехи, то очень оперативно, но без суеты мобилизуется вся мощь ОКБМ, чтобы в кратчайшие сроки устранить выявленные дефекты оборудования.

В такой манере Федор Михайлович поступал и тогда, когда в установке выявлялись дефекты в оборудовании, разработанном не ОКБМ, но которые влияли на работу установки в целом. Именно так было на моей памяти при пуске и освоении и БН-350, и БН-600.

С удовольствием вспоминаю наши дискуссии при практически ежемесячных встречах в ОКБМ. Умение внимательно слушать, выделить главное, прекрасно в спокойной манере аргументировать свою точку зрения, да еще к тому же — милым мне нижегородским говорком, все это оставляло чувство большого удовлетворения от встреч и бесед с Федором Михайловичем. А как умеет Федор Михайлович защищать то, во что сам поверил, что стало делом его жизни, — этому может позавидовать любой руководитель.

При удобных случаях я часто говорю, что ФЭИ с быстрыми реакторами (реальными, конечно) по крайней мере трижды здорово повезло:

- их научным руководителем был Александр Ильич Лейпунский;
- их основным Главным конструктором был Федор Михайлович Митенков вместе со своим ОКБМ;
- блок БН-600 попал в руки опытных эксплуатационников Белоярской АЭС.

Фёдору Михайловичу есть чем гордиться. В том числе и тем, что созданный Главным конструктором Ф.М. Митенковым реактор БН-600 оказался лучшим в мире промышленным быстрым реактором. Уверен, что будет и продолжение, «пока в стране Российской такие люди есть».

Генеральный конструктор. Директор. Профессор. Академик

*В.К.Коваленко,
АО «Атомэнерго»*

Вместо предисловия

Человек. Есть фотография и есть портрет. Фотография — это то, что в рамке. Портрет — это то, что простирается за рамки и для великих портретов уходит в Вечность. Все, что Вы прочтете ниже, — попытка уйти от фотографии и выйти за рамки, оставив на «материальном носителе» хотя бы штрихи к портрету.

Федор Михайлович Митенков...

Первый раз я увидел его в 1965 году. В то время только-только начиналась разработка проекта атомного ледокола «Арктика», и в рамках создания для него атомной паропроизводящей установки ОК-900 ОКБМ среди многих других работ по договору с ЦКБ «Айсберг» выполняло НИОКР в обоснование работы реактора этой АППУ с частичным кипением теплоносителя в активной зоне. Естественно, по ее окончании был получен отчет ОКБМ о проделанной работе, и как всякий научный отчет (особенно по таким, скажем прямо, заумным темам как теплопередача, пристеночное пузырьковое кипение и пр.) он мог бы быть просто поставлен на полку товарной продукции для бухгалтерской отчетности ЦКБ «Айсберг» как нужная только ОКБМ сугубо научная библиография. Но в те годы ко всему относились серьезно, и вердикт руководства ЦКБ был примерно таков: «Деньги на эту НИОКР потрачены немалые, в отчете много научного и околонаучного тумана и надо бы послушать ОКБМ — а что собственно полезного для нашего проекта мы получили».

И вот в один из дней в кабинете начальника—главного конструктора ЦКБ «Айсберг» собрался генералитет проекта 1052, Руководитель Группы наблюдения Мурманского государственного морского арктического пароходства за проектированием и строительством ледоколов (так тогда называлось то подразделение в системе Минморфлота, которое позднее было преобразовано в Спецгруппу Технадзора ММП), и я вместе с ним (недавно перешедший в эту Группу после не столь уж продолжительного опыта работы на атомном ледоколе «Ленин» еще с АППУ ОК-150). Все с интересом смотрят на прибывшего для сообщения об этом, в общем-то, малопонятном для большинства присутствующих научном исследовании, представителя ОКБМ — Федора Михайловича Митенкова. Против ожидаемого в соответствии с устоявшимся стереотипом солидного и импозантного научного исследователя и начальника подразделения перед нами предстал подтянутый, скорее молодой, чем средних лет, человек (позволю себе утверждение, что Ф.М. всегда выглядел моложе своих лет), с неброской, и да простится мне, «провинциальной» внешностью. С первого взгляда, он как говорится, не производил впечатления. Но уже несколько первых фраз привлекли все внимание присутствующих к нему и к тому предмету, о котором он говорил. После лекций не таких уж многочисленных (таланты — всегда редкость!) блестящих профессоров, которых я имел счастье слушать на «физмехе» Ленинградского политехнического института, и знакомства с многотомными «Курса высшей математики» В.И. Смирнова и «Теоретической физики» Л.Д. Ландау и Е.М. Лившица я прекрасно понимал, какими знаниями, умением и даром свыше надо обладать, чтобы представляемые вниманию даже неподготовленного слушателя или читателя сложнейшие вещи оказались бы для них понятными или даже очевидными не просто как пришедшие и растолкованные извне, а как те, которые они уже и сами «знали», они просто извлечены из их собственных глубин и открылись, обозначив неведомые им до этого новые горизонты сродни тому, что в русском языке именуется словами «озарение», «прозрение»... Так было и здесь. За очень простыми (как оказалось!) кипением и теплофизикой реактора скромный представитель ОКБМ открыл перспективу совмещения несовместимого или, если угодно, достижения невозможного — большая мощность в уменьшенных габаритах, интенсификация тепловых процессов не при повышенном, а при пониженном давлении, температуре, скорости...

Но ведь совмещение несовместимого требовалось не только для реактора. Не берусь утверждать, что именно на этом совещании, но уж точно оно было одним из тех, на которых формировалась уверен-

ность в достижении того, что стало впоследствии атомным ледоколом «Арктика» — в ограниченных размерах корпуса обеспечены не ограниченная временем атомная мощь 75 000 лошадиных сил, ледовая прочность, требуемая морем надежность, комфорт экипажа, безопасность в отношении излучения.

Нет нужды упоминать, что в дальнейшем это самое частичное кипение в активной зоне было использовано в проекте атомной паропроизводящей установки ОК-900.

По окончании сообщения, когда Ф.М. Митенкова уже поблагодарили за сообщение и отпустили, из итогового неформального обсуждения запомнилась фраза, которую обронил один из присутствовавших: «А этот представитель далеко пойдет...» И так оно и оказалось.

Информация к размышлению

Теперь, оглядываясь назад на многие годы и встречи с разными людьми и в разных странах, как часто я убеждался, что скрывающиеся за неброской внешностью, чаще всего незаметные в быту или обычной жизни, но проявляющиеся в «момент истины» глубины духа, высоты разума и дарованные свыше таланты вообще свойственны русскому человеку, если его извлечь из окружающего социума, освободить от скорлупы вбитой в голову, а чаще — защитной демагогии и, как говорил Штирлиц, — «разговорить». По крайней мере, так было в прошлом. «Василий Теркин» А.Т. Твардовского, «Баллада о солдате» Г.Н. Чухрая, «Портрет Мины Моисеева» И.Н. Крамского как нельзя лучше уловили и доносили до нас этот феномен средствами искусства. Танк Т-34, штурмовик ИЛ-2, истребитель МИГ-15 и, конечно же, Ю.А. Гагарин средствами техники олицетворяли и доносили этот же феномен до всего мира. Так что фигура Федора Михайловича убеждает: как русские мы пока еще живы.

С той запомнившейся первой встречи многие годы Ф.М. чаще всего предстал уже в Нижнем Новгороде в другом, знакомом мне одному, облике: просторный кабинет Директора — Генерального конструктора ОКБМ, длинный стол с рядами кресел по бокам и во главе его Федор Михайлович с неизменными остро отточенными несколькими карандашами в руке и стопкой чистой бумаги перед собой. По одну сторону стола — как хорошо знакомые за долгие годы руководители и конструкторы, так и незнакомые молодые, но от этого не менее весомые в своих суждениях специалисты ОКБМ. По другую сторону — судостроители, ученые, работники заводов и мы — представители Мурманского морского пароходства. Все происходящее

когда-то я наблюдал, находясь в конце стола, потом где-то ближе к середине, а в последние годы — бывало и справа от Федора Михайловича. После приветствий, кратких житейских вопросов, как устроились, что нового в Ленинграде, Мурманске, неизменное доброжелательно-отеческое: «Ну, с чем пришли?», — открывало совещания.

Удивительное дело. Теперь, когда, оглядываясь назад, можно оценить Монблан того, что в доперестроечные времена рождалось в стенах этого кабинета для воплощения промышленностью в металле и последующей работы во льдах Арктики, когда отлетела прочь шелуха возможных резких высказываний и забылись вероятные эмоции протеста при несогласии (наверное, они не могли не быть), в памяти не всплывают какие-то резко выделяющиеся проблемы, с которыми участники совещания приходили к Ф.М. Митенкову, и в драматических ситуациях как руководитель в последней инстанции, он вынужден был бы твердой рукой наводить порядок. По крайней мере, мне они неизвестны. Отфильтрованный временем «сухой остаток» этих встреч у Директора-Генерального конструктора — это даже не дискуссия, а интересный тебе лично, продуктивный и взаимообогащающий созидательный процесс, который затем из дверей кабинета Ф.М. плавно переходил в отделы и в другие аудитории ОКБМ, а в чем-то продолжался уже в других точках пространства и времени. Так бывает, и это, наверное, знакомо почти всем, когда кирпич ложится к кирпичу при постройке дома или встают на место детали разобранного автомобиля и когда как нельзя лучше применимо пришедшее из глубины веков русское выражение «работа ладится».

«Фантазии и чудеса какие-то!» — скажет иной читатель. Конечно, дымка времени скрывает и сглаживает многое, но чудес не бывает... Вернее они бывают, но чаще всего под ними находится вполне реальное основание. Сколько раз развенчивалась «роль личности в истории», как часто с трибун утверждалось, что «незаменимых людей нет». Но вот мы читаем книги и узнаем из них, или приходим в институт и видим: есть профессор (ректор, конструктор, капитан или главный инженер-механик...), как говорится, от бога, с исходящей от него аурой — есть остающаяся в истории «школа», нет такого профессора — нет «школы», и никто его в прежнем качестве не заменит. Э. Резерфорд, А.Ф. Иоффе — азбучные примеры основателей и руководителей таких школ.

Думаю, что и в кресле Директора-Генерального конструктора срабатывал на благо технического руководства коллектива ОКБМ (а точнее будет — многих коллективов промышленности) замеченный и отмеченный еще при самой первой встрече дар Ф. М. расчлени-

сложную или даже просто запутанную проблему на очевидные простейшие составляющие, немногословно и не повышая голоса довести их до осознания сидящих перед ним оппонентов, не прерывая дельных высказываний, кто бы их ни говорил. В итоге даже самые «упертые» оппоненты покидали совещание внутренне как минимум соглашаясь с тем, что скорее подсказанное, чем принятое Ф. М. решение, пожалуй, совсем даже и неплохое; а чаще всего с осознанным убеждением, что это решение не только неплохое, но, как говорится, «перспективное» для того, чтобы в дальнейшем оно могло быть им самим еще улучшено, если немного поработать и самому, и своему окружению. Добавим сюда демократичность Федора Михайловича, доступность его кабинета, в чем я сам неизменно убеждался, общительность вне стен ОКБМ (в том числе и на спортплощадке) — и станет понятно, почему в течение более чем двух десятков лет Федор Михайлович в сущности возглавлял «школу» конструкторов, где талантливыми головами идеи непрерывно генерировались, безжалостно, но в высшей степени свободно, непредвзято и компетентно фильтровались, а затем реализовывались. А о том, что в известных мне реакторных установках ОК-900 или КЛТ-40 ОКБМ реализованы многие и многие совершенные и достойные своего времени технические решения, говорит и недавняя публикация в западной печати (со стороны — виднее!), в которой малая транспортная атомная энергетика наравне с технологией каскадно-центрифужного обогащения урана признаны техническими достижениями России, которым еще и сегодня нет равных в мире.

Ну, а что касается не оставшейся в памяти внешней заметности действий Федора Михайловича... Еще в далекой молодости, после окончания никакого отношения к морю не имевшего Ленинградского политехнического института, вступив на борт еще только готовившегося к выходу в море атомного ледокола «Ленин» и окунувшись в понятную любому суматоху, а точнее — целую эпопею достройки и избавления от «детских болезней» этого уникального объекта, на первых порах я удивлялся — почему в кажущемся беспорядке, если не хаосе, не слышно на каждом шагу отдаваемых грозным голосом команд капитана? Где он? Но потом быстро понял, что высший класс для капитана — не команды «Все наверх!», а само его внешне незримое присутствие на борту. И не только для него. Многим в ОКБМ наверное памятна видная любому проходящему, через почти все время открытую дверь каюты, фигура незабвенного первого главного инженера-механика атомного ледокола «Ленин» Александра Калиновича Следзюка, в овейном ветрами морей скромном кителе, склонившаяся за письменным столом над чтением чего-то, немногие, но в нужное

время и в нужном месте негромко сказанные слова, а не разнос в ЦПУ или машинном отделении, спокойная беседа на равных с теми, кто входил в каюту или вне ее — будь то академик или такелажник. Так что шумовые и эмоциональные эффекты на таких высотах не только не показательны, но и не показаны.

Ф.М.Митенков и «Атомэнерго»

Это совсем другая история.

1992 год. Стало ясно как день, что случилось необратимое, и приходят новые времена... Нет и не будет съездов Коммунистической Партии Советского Союза и их решений. Ушли в прошлое Политбюро ЦК КПСС, Комиссия по военно-промышленным вопросам, Госплан СССР и многие другие структуры, в недрах которых собственно когда-то и рождались, а затем приобретали организационно-финансовую основу атомные ледоколы. Не к месту, но почему-то в голове все время возникали осевшие со времен средней школы известные слова Ивана Владимировича Мичурина: «Не надо ждать милостей от природы, взять их у нее — наша задача». В хаосе кооперативов, ВТК, фондов, центров, МНТК и прочих как грибы выраставших новообразований процессов передела и присвоения собственности не хватало чего-то серьезного для такого дела как атомная энергия. Но вот со страниц газет соскользнули слова «акционерное общество». Трудно сказать, что знал о них в то время Ф.М., но, например, передо мной, наивно открывшим попавшиеся под руку простейшие учебники «единственно верной» политэкономии, предстали соседствовавшие с этим понятием обороты типа «форма выколачивания прибыли в капиталистическом обществе», «элемент потогонной системы империализма»... К счастью, двух страниц убористого, в старом правописании, текста из оказавшейся рядом двадцатитомной энциклопедии 1913 года оказалось достаточно, чтобы понять, что ничего лучшего для самостоятельного объединения усилий нескольких цивилизованных партнеров и привлечения средств под большое и долговременное дело прогрессивная часть человечества не придумала. С этим предложением и обратились мы к многолетним партнерам по строительству и эксплуатации атомных ледоколов, в том числе и к ОКБМ.

И снова — удивительное дело. Казалось бы, ОКБМ, как выросшее из оборонных технологий и прочно вросшее в них, насквозь государственное в своем существе предприятие, могло сторониться втягивания в какие-то параллельные, не указанные свыше и не апробированные опытом структуры. Ничего подобного. Это часть других партнеров вначале занимала нейтральную или выжидательную

позицию, а с ОКБМ сразу было все ясно. Наверное, в процедурах голосования, перечисления пусть и символических, но все же реальных средств ОКБМ в уставной капитал АО «Атомэнерго», да и просто в обменах мнениями в стенах ОКБМ принимали участие многие, но именно от Ф.М. в том самом упомянутом выше кабинете и за тем же длинным столом применительно к идее акционерного общества «Атомэнерго» мы услышали скорее не слова, а программные установки: «самоорганизация», «сохранение сложившейся кооперации», «опора на проверенные технические решения». И не случайно еще в 1993 г. Ф.М. возглавил стратегическое руководство «Атомэнерго» и до сего времени он является Председателем Совета Директоров общества. Именно в этом качестве, а не только как Директора-генерального конструктора ОКБМ, действия Ф.М. были одними из решающих при получении «Атомэнерго» контракта на разработку проекта атомной теплоэлектростанции с плавучим энергоблоком. Но это уже другая история, о которой уместно упомянуть, отступив немного в сторону с тем, чтобы потом вернуться к фигуре Ф.М. и завершить это повествование.

1994 год. Евгений Иванович Игнатенко

Когда извилистые жизненные пути и случайные (а может быть, и не случайные?) обстоятельства сводят с личностями такого масштаба, невольно на ум приходят слова «удача», «рука судьбы», «благословение Господа»... Что могло найти микроскопическое «Атомэнерго» в Москве, в бесконечных коридорах многоэтажного здания на Китайском проезде, пропитанного за многие годы духом ГОЭЛРО, Минэнерго, Единой энергетической системы Советского Союза с ее гигантами энергетики? Казалось бы, что общего может быть между Концерном «Росэнергоатом» с его железобетоном десятков атомных энергоблоков в миллионы киловатт, собственными правилами, своими годами формировавшимися на твердой земле России устоями и, если угодно, менталитетом сотен тысяч энергетиков с одной стороны и плавающими на морских задворках Сибири, еле-еле дотягивающими до 30 тысяч киловатт реакторами атомных ледоколов с их живущими совсем в другой стихии судостроителями и моряками? Конечно, свою роль сыграли те, кто нас даже и не привел, а скорее провел мимо секретарей в кабинет Е. И. и представил ему (о них – особо и в свой час), но оценим выше всего все же прозорливость и дар Е.И., увидевшего, ЧТО можно создать из разнородного и на первый взгляд невзрачного набора попавших в поле его зрения столь далеких от Концерна, но все же – энергетических составляющих. Естественно,

не в вакууме находился Е.И., многое лежало на поверхности (и не один год до него!), но именно Е.И. создал целостную картину энергетического объекта нового типа, запустил процесс его реализации и определил границы и ориентиры, до которых мы и сегодня не только не дошли, но даже до глубокого понимания которых, позволю себе сказать, еще не доросли.

Сегодня, когда многие как мечту и откровение преподносят продажу за пределы России не примитивных энергоресурсов и леса, а «высоких технологий», Е.И. в концепции плавучих атомных энергоблоков видел возможность выхода Концерна «Росэнергоатом» на внешний рынок с принципиально новой продукцией и продажи на экспорт не самих «высоких технологий» и даже не подверженной пиратскому копированию конкурентами «продукции с высокими технологиями», а выработанной с применением сохраняемых в собственности России «высоких технологий» энергии. (Так многие годы Минатом получает миллиарды долларов от продажи по схеме ВОУ – НОУ высокообогащенного урана, который был выработан на созданных талантами, трудами и жертвами наших предшественников, скрытых в глубинах России и недоступных конкурентам или потенциальным врагам обогатительных производствах не просто высоких, а сверхвысоких технологий).

Е.И. реально оценил, что именно малая атомная энергетика, с прицелом не только на внутренний рынок, но и на экспорт, по многим параметрам как нельзя более подходит для «обкатки» будущего развития атомных установок, как сейчас говорят, на коммерческой основе, и обычного в реальной экономике цивилизованных стран инвестиционного процесса. (Наверное, он думал при этом не только о «малой», но и о «большой» атомной энергетике).

Оглядываясь назад, понимаешь, что Е. И. некоторое время внимательно присматривался к самим учредителям, партнерам «Атомэнерго» и их способностям, выработывая итоговую оценку всей возможной затеи с проектом плавучей атомной электростанции, в том числе и с учетом точки зрения не одного стороннего и объективного специалиста или руководителя. Конкурс атомных теплоэлектростанций малой и средней мощности, организованные Е. И. представления идеи проекта на расширенном техническом совете Российского союза промышленников и предпринимателей, Технических советов Минатома России и «Росэнергоатома» и, наконец, выполненные в 1994 г. «Атомэнерго» совместно с ЦКБ «Айсберг» и ОКБМ по договору с Концерном работы по оценке возможности использования атомных ледоколов в качестве энергоблоков и разработке технического задания на проект атомной теплоэлектростанции на базе плавучего

энергетического блока с реакторной установкой типа КЛТ-40 служили не только целям подготовки и общественного одобрения проекта, но и вообще проверке дееспособности совершенно новых для Концерна возможных деловых партнеров – судостроителей.

8 – 9 сентября 1994 г. С.–Петербург, конференц–зал дирекции Балтийского завода

Именно здесь была подведена некая черта и был дан «зеленый свет» этому проекту. Только авторитет и, как официально выражаются, личные качества Е.И. смогли собрать здесь вокруг стола под эгидой Концерна «Росэнергоатом» и под председательством самого Е.И. далеко не последних представителей аппарата Правительства Российской Федерации, Минфина, Госкомоборонпрома, Госатомнадзора, Президента АООТ «Балтийский завод», Председателя Совета директоров АООТ «Атомэнерго» – директора ОКБМ, академика Ф.М. Митенкова (так в протоколе), Генеральных директоров АООТ «Айсберг», «Малая энергетика», «Атомэнерго». Сохранился для истории официальный протокол с их увековеченными подписями и ключевыми словами в адрес проекта: «считать первоочередной задачей...» и «Концерну «Росэнергоатом» обеспечить разработку ТЭО и технического проекта...», после чего подписание контракта не только на разработку проекта, но и на запуск в производство основного оборудования реакторной установки с длительным циклом изготовления, да, пожалуй, и сама разработка проекта были уже, как говорится, делом техники.

Но из протокола можно видеть только ЧТО родилось, но не видно КАК это родилось. А между тем, как «дьявол скрывается в мелочах», так и большие дела начинаются с нажатия часто незаметной кнопки. Именно в том, кто и какую кнопку нажмет, скрыт ключ к пониманию значения для простых смертных таких личностей – лидеров как Е.И. Официальное совещание завершилось краткой обычной в таких случаях фразой председательствующего Е.И. типа «полагаю, всем все ясно, готовьте протокол», и на следующий день он был подготовлен (все же серьезными людьми, не мальчиками!) в обычном, в общем-то, духе так хорошо знакомых по страницам официоза «Российская газета» правительственных руководящих документов: «согласиться, улучшить, углубить, увеличить...». По прочтении протокола в неформальной обстановке неформальная мгновенная реакция Е. И. была примерно такой, краткой и выразительной, сопровождаемая пронизательным взглядом: «Я вас не понимаю. Если вы **судоСТРОИТЕЛИ** и действительно хотите и можете делать

дело, о котором вещаете и которое принесет пользу Концерну и вам, то пишите короткий и ясный протокол – руководство к действию и вместе – вперед... Концерн вас не бросит. Если сами не знаете, чего хотите, или хотите не то, что говорите – нечего и огород городить». Все дальнейшее – переосмысленный и подписанный в итоге протокол, прошедшее в торжественной обстановке в Концерне «Росэнергоатом» уже 31 января 1995 г. подписание контракта на разработку проекта, немедленно открытое финансирование (пусть не всегда деньгами, чаще – денежными суррогатами) и разворот работ по проекту – были в сущности следствием нажатия той самой стартовой кнопки и движением в том направлении, которое в оставшейся в памяти краткой речи определил Евгений Иванович.

И здесь самое время вновь вернуться к фигуре Ф. М. При всей многоплановости и грандиозности идеи проекта плавучей атомной теплоэлектростанции в ней были, в общем-то, две главные и связанные между собой составляющие:

1. Какая техническая часть проекта является определяющей и наиболее рискованной, той, что может либо вознести проект к высотам технического прогресса, либо безвозвратно похоронить его?
2. Кто может быть гарантом серьезности проекта, способным при возникновении неизбежных и непредсказуемых технических проблем не уходить в сторону, а решать их?

В жизни это называется «на кого можно положиться, когда идешь в разведку».

Конечно же, как и много десятилетий назад на заре атомных ледоколов, было ясно, что прежде всего атомная паропроизводящая установка, а точнее АТОМ в самом широком смысле слова определяет в этом проекте все и именно с этой стороны должна возникнуть авторитетная фигура, которая может сделать то, что для других проектов в свое время сделали и с чем вошли в историю И.В. Курчатов, С.П. Королев, адмирал РикOVER, Анатолий Петрович Александров.

И вот перед нами подлинные фотографии момента подписания контракта на разработку проекта атомной теплоэлектростанции с плавучим энергоблоком с реакторной установкой типа КЛТ-40, сам подлинный сохранившийся контракт. За столом подписания контракта по правую руку от Е.И. – мы видим Ф.М., рядом с официальными подписями «Заказчик», «Исполнитель» на контракте стоит и подпись Ф.М. Конечно же, она не скреплена печатью, но можно с полной уверенностью утверждать, что именно эта подпись была для Концерна и Е.И. итоговым свидетельством – гарантией весомости и серьезности проекта и вряд ли без Ф.М. и его подписи контракт вообще бы состоялся. Сохранились многие предшествующие протоколы

технических совещаний, относящихся к подготовке проекта атомной плавучей теплоэлектростанции и реакторной установки для нее, с неизменным участием в этих совещаниях Ф.М., а о количестве и уровне известных и оставшихся за скобками известности встреч, официальных и неофициальных переговоров и бесед Ф.М., олицетворявшего для этого проекта опыт, компетентность и мощь не только ОКБМ, но и всей атомной промышленности, можно только догадываться. И если, как и для любой деятельности, важен результат, то здесь он — налицо.

Здесь, наверное, самое место сказать о том отдаленном и в конечном итоге самом главном результате, который виделся Е.И., который понимал Ф.М., но которого достигнут, наверное, уже последователи Е.И. и Ф.М.

Е.И., конечно же, прекрасно разбирался во всех сложностях и тонкостях как атома, так и энергетики, но он и по статусу Вице-президента Концерна и, как можно заключить из в общем-то немногочисленных встреч с ним, по складу ума был не столько инженером, сколько лидером в самом глубоком значении этого слова. Это нас, входящих в его кабинет, он, как правило, приветствовал шутливо-дружелюбным — «ученые». Сам же Е.И. смотрел в основу и в самую сущность любой практической деятельности, в том числе и той, с которой пришло к нему «Атомэнерго». Это — деньги.

Неумный сразу скажет: «А, знаем, счет в банке на Каймановых островах и особняк в Испании...». Умный — тяжело вздохнет и ничего не скажет, а только задумается: «Да, это проблема... Это тебе не реактор или плавучую атомную станцию нарисовать..», понимая, конечно же, что речь идет не о тех деньгах, которые «выбивают» и тратят, а о тех, к которым громко, но в сущности правильно применяют определение «кровь экономики» и которые если уйдут в проект, потом должны будут неминуемо вернуться с прибылью, а если этого нет — то перед нами труп и его можно только похоронить.

Е.И., по крайней мере на моих глазах, мало интересовался технической частью, безопасностью и научно-инженерными достоинствами проекта, справедливо полагая, что эту-то, в общем простейшую часть проекта, мы решим. Он смотрел в другие, невидимые или неведомые нам (а быть может, мы не хотели или боялись ведать о них) горизонты всегда суровой экономической реальности. Предупредительный сигнал экономических ограничений и требований, дальновидных оценок принимаемых технических, да и всех других решений с позиций интересов и конечной, прежде всего экономической, выгоды многих существующих и будущих участников проекта и потребителей его продукции всегда

звучал при встречах с ним. Как и Ф. М. он никогда не диктовал свою волю, а только в лучшем случае давал импульс или недвусмысленный, но все же совет, прекрасно понимая, что перед ним руководители больших коллективов и в этом качестве они могут делать наилучшим образом не то, что навязано им, а то, в чем они убеждены сами.

Я прекрасно помню его неоднократные прямые рекомендации, иногда даже в форме конкретных предложений «Атомэнерго» и его партнерам соразмерять финансовые аппетиты проекта с реальными возможностями не только Концерна, но и других структур, и так же как мы это делали в технической части проекта, и здесь искать и находить нестандартные решения для совмещения, казалось бы, несовместимого. Пожелтели, но еще целы страницы полученных в 1994–1995 гг. «Атомэнерго» предложений, отразивших сформулированные или поддержанные Е.И. идеи о создании акционерной структуры для формирования первоначального капитала и привлечения на его основе негосударственных инвестиций в строительство атомной плавучей теплоэлектростанции: 10 % от строительной стоимости проекта – так трезво оценивал Е.И. масштаб его государственной поддержки, и годы вряд ли изменили эту прагматичную оценку. Е.И. приглашал осознать, что львиную долю всех капиталовложений в проект (и, следовательно, прибыли) получит судостроительная промышленность со своими, в том числе и атомными, контрагентами, и поэтому в первую очередь именно она со всей своей мощью могла бы не ждать их пассивно, а активно «вступить в игру» и выразить свой интерес и определенную ответственность за проект прямым или косвенным участием в формировании его финансовой основы. Лично свидетельствую, что дважды Е.И. выражал готовность к соответствующему диалогу и, указывая на открытую дверь своего кабинета, ожидал увидеть в ней Завод – строитель энергоблока или тех, кто за ним невидимо стоит. Не дождался... Даже такой сложный и деликатный вопрос как интеллектуальная собственность проекта и права на нее был поднят Е. И. и в диалоге с Ф.М., который представлял не только ОКБМ, но и «Атомэнерго» с его партнерами, была найдена платформа для его позитивного решения.

Но в самом конце 1995 г. был принят Закон «Об использовании атомной энергии», установивший государственную собственность на реакторные установки. Передел собственности, олигархи с их холдингами и залоговыми аукционами, дефолт, экономическое выживание в среде взаимозачетов, векселей и других денежных суррогатов и прочее из этого ряда отодвинули для промышленности

реальную экономику на второй план. Новые законы, новые правила власти не только не поощряли, а скорее препятствовали реальному предпринимательству как в экономике, так и в технике, выбивая у партнеров «Атомэнерго» последние стимулы заниматься далеко не простой экономической оптимизацией технических решений и без того сложнейшего проекта. Неожиданно и преждевременно ушел из жизни Евгений Иванович. С ними отодвинулись в проекте проблемы экономики и денег в том самом глубоком их понимании, о котором сказано выше.

В будущем году проекту исполнится 10 лет... «В бумаге» он выполнен *de facto*, но со словом строительство все чаще ассоциируются слова «денег нет».

Денег всегда нет. С другой стороны деньги всегда есть, поскольку есть истина основоположника в примерном изложении: «при 5 % прибыли капитал не просыпается, при 10 % он активен, а при 50 % – готов на все» и если капитал неподвижен – значит его не разбудили или не ответили на вопрос «а прибыль где?». Для самоуспокоения всегда к услугам слова «это невозможно», «жернова истории» и утешающий постулат маркетинга «любой товар рано или поздно может быть продан» и, будем надеяться, так скорее всего и произойдет, но лично у меня остается глубокое чувство неудовлетворенности и ощущение того, что мы упустили какой-то жизненно-важный по опыту атомных ледоколов шанс, видели если не удачу, то ее тень, на которую указывал Е. И. и которую видел Ф. М., но – не протянули руку.

Ретроспектива к размышлению

«И невозможное – возможно...» встречаем мы у А. Блока.

Действительно, возможно. При определенных условиях, а не просто так. Наверное, этих условий может быть много, но для признанного в мире успеха атомных ледоколов – это прокрустово ложе жесточайших ограничений, которые они по самому своему существу десятилетиями налагали по весам и габаритам на все, что надо было разместить или что надо было обеспечить на борту. На самом ничтожном из тысяч чертежей ледокола вы увидите незаметный штамп: масса того, что нарисовано на чертеже, и ее координаты X, Y, Z. И в отношении любой установки, тем более реакторной, неизбежно вставал вопрос: а возможно ли разместить на борту то, что предлагают, и обеспечить тем, что требуют? А если невозможно – то что делать? Именно отсюда если не появление, то востребованность Ф.М. и фигур равного ему калибра, способных улавливать и реализовывать идеи, которые и позволяли делать невозможное возможным. Ну и, наверное,

дошедшее из глубины веков: «Идеи зреют быстрее, когда кровь мучеников питает их...»

1950 год. Еще живы Иосиф Виссарионович и Лаврентий Павлович. Не без их, наверное, участия в переходах и недрах старинного особняка Демидова в Ленинграде разработан и представлен проект паротурбинного ледокола мощностью 40 тыс. л.с. с обычными котлами на жидком топливе. Этот проект, к счастью, как говорится, «не пошел». Предлагается (в те годы это слово имело свой подтекст) в том же самом корпусе и с той же паротурбинной установкой проекта 90 вместо паровых котлов разместить три атомных реактора установки ОК-150. Вдумайтесь в это! Но сказано — и в 1959 году сделано. Это был уже проект 92 — первый в мире атомный ледокол «Ленин».

1967 год. Проект 92М — модернизация атомного ледокола «Ленин». Уже не в корпусе, а всего лишь в отсеке корпуса проекта 92 и, не трогая остальной части ледокола, вместо трех реакторов установки ОК-150 надо было рискнуть и разместить два реактора новой установки ОК-900 большей мощности, которая еще только разрабатывалась.

Сделано в 1970 году. Проект 1052. Затем — атомный ледокол «Арктика» и все последующие.

Выше, в самом начале, кипение в активной зоне приведено только как характерный и в данном случае связанный с личностью Ф.М. пример. А сколько удивительных (сегодня, спустя почти полвека кажущихся простыми и очевидными) технических решений скрывается за тем, чтобы эта ретроспектива стала реальностью. «Выбег», «перевернутый парогенератор», ЕЦ и саморегулирование, ЗО «две в одном», обоснование безопасности МПА — только первое, что пришло на ум. Но об этих технических решениях, о тех, кто за ними стоял, и о том, как они стали возможными, — это уже совсем другая тема.

«Из общих соображений», как любят говорить ученые, ясно, что точно такой же механизм прокрустовы ложа жесточайших, на этот раз экономических, ограничений мог бы быть запущен для проекта уже совсем другого направления, в котором именно деньги решают все. Он пробудил бы к жизни не меньшие таланты с их идеями и привел бы точно к такому же результату достижения того, что сначала казалось невозможным. («Кровь мучеников...» — оставим в скобках.)

И, наконец, последнее — свобода

Свобода, без которой не сделать шага в неведомое.

Не годы, а десятилетия, и именно тогда, когда рождались проекты 92, 92М и 1052, в кабинете Ф.М. на любых совещаниях, да и не только на них, я не встречал никаких «представителей надзорных органов»

(технических, конечно) и не слышал слова «правила» в их сегодняшнем устрашающем обличье. Да и правил для тех объектов, что тогда создавались, к счастью не существовало, а Ф.М. и разумные предшественники не спешили их писать. То есть все, конечно же, знали и Третье Главное управление Минздрава, и Регистр СССР с их документами, но если они и приглашались, то только как равноправные участники созидательного диалога. Рождалось что-то принципиально новое, если не сказать невозможное — и какие могли быть для этого правила, кроме исчерпывающего знания законов природы и того, что уже пройдено ранее, включая и минимум правил, давно известных и утвердившихся как естественные нормы жизни. Новые правила — это было то, что создавал Ф.М. и те, кто располагался за длинным столом в его кабинете. Если уж и был кто находившийся ближе к всевышнему в определении границ технически разумного, то — одно лишь Научное Руководство.

С тем, чтобы не создавался уж совсем иконописный образ Ф.М., позволю себе высказать сугубо личное замечание — как страшный сон видишь спустя девять лет подпись Ф.М. и свою подпись под словами протокола: «просить ...Госатомнадзор, Госкомэпиднадзор и Минприроды России разработать в 1995 г. критерии и нормы по ядерной, радиационной и экологической безопасности для АТЭС с плавучим энергоблоком...». Кто кого должен просить?! Предшественники — не просили правил, они их создавали. В лозунге «Что хорошо для «Дженерал моторс» — хорошо для Америки» скрыт, наверное, более глубокий смысл, чем только «ограбление трудящихся».

Теперь, оглядываясь назад и держа в руках эти самые сегодня потоком рождающиеся пухлые критерии и нормы на все и вся, с ужасом взирая на немедленно на их основе воздвигаемые бюрократическими структурами административные рогатки, скорее следовало бы просить ни в коем случае не разрабатывать никаких новых правил, а сначала дать свободу промышленности создать проект, который разбудит капитал, найдет своего Потребителя, заработает Прибыль и только потом из этой прибыли сама промышленность разработает Правила, защищающие созданный продукт и способствующие его продвижению на внутренний и внешний рынки. Но джинн выпущен из бутылки...

В осознании содеянного и попытках загнать его обратно уже сам Президент подписал Федеральный закон «О техническом регулировании» и все чаще произносит слова «административная реформа»... Так что, может быть, у нас еще все и получится?

13 апреля 1995 года



Санкт-Петербург. Совет директоров АО «Атомэнерго»
(Слева направо)

- В. В. Рукша – ОАО «Мурманское Морское пароходство,
Начальник Управления атомного флота
- С.Н. Пичугин – ФГУП «Ремонтно-технологическое предприятие
«Атомфлот», Главный инженер
- В. Ф. Лопухов – Начальник Производства, ОАО «Нижегородский
машиностроительный завод»
- Ф. М. Митенков – Директор, Генеральный конструктор ОКБМ.
Председатель Совета директоров
- А. Н. Макеев – ОАО «ЦКБ «Айсберг», Директор
Заместитель Председателя Совета директоров

ОКБМ и быстрые реактры: сквозь годы и покаления

А.А. Ринейский, доктор технических наук

Счастье всегда на стороне тех, у кого
самые большие батальоны.
Наполеон

Зеркало памяти начинает работать в момент обдумывания прошедших событий. Стараюсь извлечь их, углубляясь в почти сорокалетнюю давность. А это – уже история. Достоверность события – факт. По Марксу в науке (и это признается всеми) факт есть результаты опыта (эксперимента), многократно подтвержденные теорией (расчетами). В истории и политике трактовкой событийного факта может быть не результат происшедшего, а то – какой смысл придало событию преобладающее общественное (или считающееся таковым) мнение. Например, результаты Бородинского сражения участвующими в нем сторонами истолковываются весьма по-разному; хорошо известны нынешние, весьма противоречивые интерпретации исторических событий в России, включая Октябрьскую революцию. Поэтому с учетом конкретной исторической обстановки и общественной интерпретации, привязанной к определенному временному промежутку, исторические факты звучат и воспринимаются по-разному, значимость их, как и личностей, с ними сопряженных, может трактоваться даже со сменой знака.

Научно-техническим фактом является освоение в СССР/России технологии быстрых реакторов-бридеров с натриевым теплоносителем. За прошедшие более чем полвека в нашей стране накоплен всеобъемлющий опыт конструирования, проектирования, строительства и эксплуатации этих установок благодаря созданию быстрых реакторов БР-5/10, БОР-60, БН-350 и БН-600. Были созданы и проверены на опыте эффективные теоретические, инженерные и технологические методики и нормативные материалы.

Ощущая поддержку живых свидетелей прошедших событий, вполне правомерно отметить, что историческим фактом является создание научно-технических основ быстрых бридеров, а также научное руководство их промышленной реализацией Физико-энергетическим институтом (ФЭИ, А.И. Лейпунский, О.Д. Казачковский, В.В. Орлов, М.Ф.Троянов и другие). Этому способствовало создание в ФЭИ первого в Европе быстрого реактора БР-5.

Опытному конструкторскому бюро машиностроения (ОКБМ) принадлежит выдающаяся роль в конструировании, реализации в техдокументации и металле натрийохлаждаемых быстрых реакторов. Здесь определен рациональный профиль атомной паропроизводящей установки (АППУ) с реактором на быстрых нейтронах, впервые разработаны оригинальные конструкции реакторов, оборудования и систем, испытаны в реальной среде (натрии) при рабочих параметрах почти все компоненты реакторных установок БН-350 и БН-600. Невозможно переоценить роль сотрудников ОКБМ в квалифицированном авторском надзоре за качеством изготовления, монтажа и пусконаладки реактора, оборудования и систем.

Путь освоения технологии БР в СССР/России с постепенным усложнением задачи: экспериментальный (инженерный) реактор БР-5/10 (Обнинск)→ экспериментальная АЭС БОР-60 (Дмитровград); наращивание мощности сравнительно небольшими ступенями: многоцелевой демонстрационный энергоблок с реактором БН-350 (Шевченко, Казахстан)→ полукоммерческая АЭС БН-600 (Белоярская АЭС)→ строящаяся коммерческая АЭС БН-800, предусматривающей проверку материалов, конструкций и систем на предыдущих этапах, испытание нового оборудования на стендах при рабочих условиях, подтвержден надежной работой и не столь высокой (на 30–40 % выше по сравнению с тепловыми реакторами) ценой установленного киловатта АЭС БН-600. Поэтому БР и натрий у российских специалистов себя не скомпрометировали, технология БР в целом освоена и признана жизнеспособной с большим потенциалом совершенствования.

Западу и Японии такого опыта не хватило. В странах было построено, в основном, по одному экземпляру БР. В английском PFR (250 МВт(э)) неудачными оказались конструкция, материал парогенератора (ПГ), способ соединения трубок с трубной доской: приварка их к кромке отверстий в трубной доске со стороны натрия без отжига сварного шва была причиной трещин в нем и течей воды/пара в натрий. Это вместе с другими инцидентами из-за ошибок проекта (заброс масла из насосов в реактор и длительная (18 месяцев) очистка 900 т натрия; трещины в ТО аварийного расхолаживания натрий/воздух) привело к досрочному закрытию установки PFR.

Негативное влияние на работу АЭС «Феникс» (250 МВт(э)), прекрасно работавшей на первом этапе (~ 100000 ч с $T_{\text{вых}} \sim 560$ °С и КПД паросилового цикла 45 %), оказали трещины в выходных патрубках протеплообменников (ПТО) и околошовные трещины в натриевых трубах второго контура и патрубках ПГ; одна из причин – использование стали с добавками титана. Усилий и средств на ремонт/замену ПТО и труб (длина – до сотни метров, диаметр – до 500 мм) хватило на две из трех петель; реактор был переведен в статус опытного с мощностью 2/3 от номинала и после 5 лет реконструкции (затраты 250 млн EUR¹) в 2003 г. пущен в эксплуатацию на двух петлях до 2008 г. для завершения программы по трансмутации актиноидов.

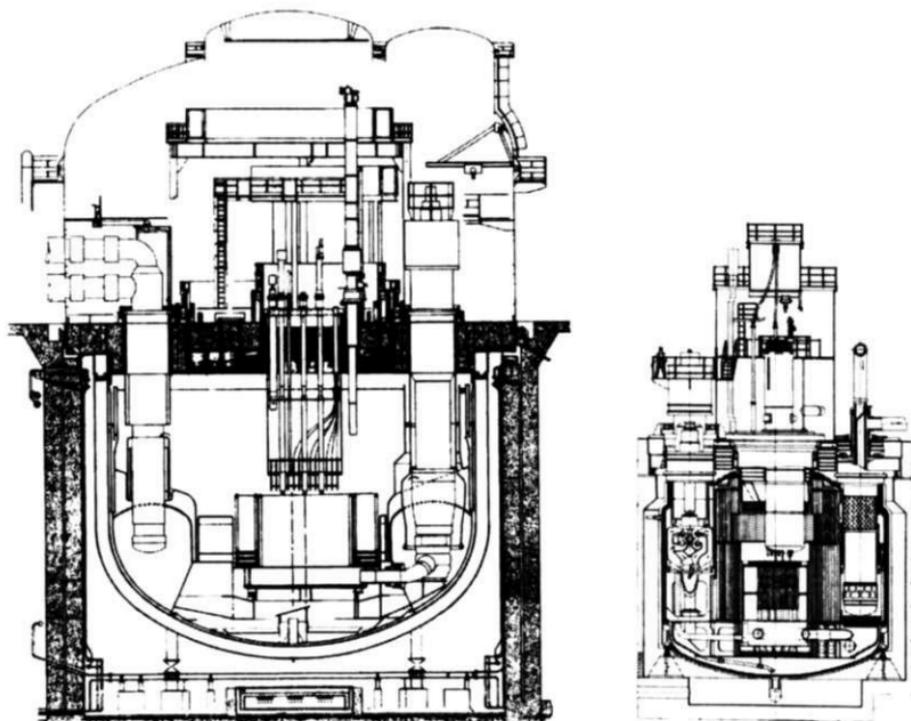
Японский БР «Монжу» (280 МВт(э)) был остановлен во время энергопуска из-за течи натрия (чехол термопары $\varnothing/L=22/200$ мм, установленный под углом 90° в трубе второго контура $\varnothing 560$ мм, отломило пульсирующим потоком теплоносителя; через отверстие $\varnothing 10$ мм неостановленным насосом второго контура в бокс выдавило ~ 1 т натрия, где он и сгорел). Неадекватные действия персонала во время и после инцидента усугубили его последствия, что затруднило получение разрешения на повторный пуск реактора после реконструкции.

Важнейшей вехой на пути освоения технологии БР является строительство и ввод в эксплуатацию двух полукоммерческих реакторов: БН-600 и «Суперфеникс» (СФ). Эти реакторы характеризуются существенно различной конструкцией (см. рисунок на стр. 372), экономикой и надежностью. БН-600, введенный в эксплуатацию в 1980 г., устойчиво и эффективно работает в энергосистеме Урала (КИУМ ~ 75 %, $T_{\text{вых}} \sim 545$ °С, КПД паросилового цикла – около 43 %).

Реактор СФ мощностью 1200 МВт(э) создавался, когда во Франции был лишь опыт по реактору «Феникс», то есть коэффициент экстраполяции от «Феникса» к СФ, равный пяти, был весьма высок, что потребовало соответствующих запасов на технологическое незнание. Последнее явилось причиной увеличения размеров реактора и объемов натрия², усложнения структурной схемы АППУ и строительной части. Реактор СФ, в связи с прогнозируемым резким ростом цен на уран, был ориентирован на короткий внешний топливный цикл, с прямой выгрузкой из активной зоны теплонапряженных крупногабаритных

¹ Nucl. Eng. Int., August, 2003, p. 6

² Удельные объемы собственно интегральных реакторов ($\text{м}^3/\text{МВт(э)}$): 5,7 – СФ, 2,4 – БН-600; удельные загрузки натрия в первый контур ($\text{т Na}/\text{МВт(э)}$): 3,1 – СФ, 1,3 – БН-600 (а должно было быть наоборот), то есть, для СФ из-за нерационального проекта не сработал такой важнейший фактор снижения удельных натуральных, а равно и стоимостных показателей, как увеличение единичной мощности реактора.



Реакторы: «Суперфеникс» – слева (боковая нейтронная защита не показана) и БН-600 – справа, в одном масштабе

выгоревших ТВС. Для операций с ТВС с остаточной мощностью до 28 кВт вне реактора была создана громоздкая и материалоемкая система, включающая весьма крупногабаритное оборудование, например, двухэтажный барабан отработавших топливных сборок (БОС), в котором они охлаждались натрием для снижения мощности до 7,5 кВт перед отправкой на переработку. Этот компонент системы, (оказавшийся неработоспособным из-за трещин в корпусе по своим габаритам ($\varnothing 9$ м, $H=13$ м) и массе натрия в нем (700 т)), близок к реактору БН-600. Затратное исполнение установки СФ, сложная ее структура с ненадежным оборудованием предопределили весьма высокую³ – в 2,7 раза по сравнению с тепловыми реакторами – цену установленного кВт(э); частые и продолжительные остановки энергоблока из-за инцидентов. На установке СФ с начала загрузки топлива (июль 1985 г.) и до ее закрытия (июль 1998 г.) имели место 101 инцидент/событие; 66 из них не связаны со спецификой БР, среди 35,

³ CARLE, R, Detailed design studies demonstrate major improvements in economics, Nucl. Eng. Int., Feb, 1988, p. 18

собственно связанных с БР, 16 связаны с натрием. Семи инцидентам был присвоен уровень 1, двум – уровень 2 по Международной Шкале Ядерных событий⁴. Это вместе с трудностями исправления проектных дефектов и явилось одной из причин волевого досрочного закрытия АЭС СФ левым Правительством Франции и формирования у отдельных специалистов негативного отношения к натриевым БР, усилившегося проблемой утилизации огромных объемов натрия (5400 т в АППУ СФ) в процессе вывода из эксплуатации. Можно с уверенностью утверждать, что если бы реактор СФ показал надежность и экономику на уровне БН-600, отношение к развитию БР в Европе и мире было бы иным.

Главными героями этой книги, которая, может быть, станет точкой схождения коллективных и личных результатов, являются ОКБМ и юбиляр – академик Федор Михайлович Митенков (ФММ). Они-то и находятся в наиболее сложном положении, поскольку «всякий, кто берется описывать свою деятельность, подвергается риску показаться неполным, ибо ... о добрых своих делах мы часто молчим» (Гете). Впрочем, дело не в том, чтобы подкрепить их авторитет выдающимися фактами и событиями. В этом можно легко убедиться, зайдя на web-site ОКБМ («...по чертежам предприятия изготовлено 500 реакторов: специальных, судовых, энергетических...» (!)). Для меня жанр юбилейного события подразумевает не только и не столько подведение промежуточных итогов, а в большей мере подразумевает разметку перспектив. Важно, конечно, то, что было, но еще важнее то, что может быть исходя из происходящего сегодня. Вооружившись этими соображениями, решусь выделить несколько значимых тем и событий общественного и иного характера.

Более чем 30-летняя совместная работа с ОКБМ по быстрым реакторам, шестилетняя служба в Международном агентстве по атомной энергии (МАГАТЭ) в Вене по организации обмена информацией и координации деятельности МАГАТЭ по тематике БР, дали возможность сравнить уровень «технологии» разработки БР в СССР/России, Европе, Японии и США. Согласно оценкам, и не только моим, ОКБМ – самая квалифицированная конструкторская организация по БР, таких в мире просто нет. По быстро-нейтронному направлению атомного машиностроения здесь выращены инженерные кадры высочайшей квалификации, сконцентрированы знания и опыт, создана школа, что и явилось ключевым фактором успешного освоения БР в СССР/России. Взаимодействуя с конструкторами, я восхищался

⁴ RAHMANY, L., et al., SPX significant events and whether it would have happened on EFR, IAEA TECDOC-1180, Vienna, 2000

воплощенными результатами, — чертеж несет в себе субстанцию реальности, которую не может выразить ни отчет, ни доклад, ни статья. Предложенные учеными идеи-«болванки», «обточенные» конструкторами, превращались в современные инженерные «скульптуры».

Проблемы (задачи) решает коллектив, но формулирует их, ставит, отслеживает их выполнение и отвечает за результат руководитель. ОКБМ славится своими руководителями, — здоровый коллектив воспроизводит достойных руководителей. Я начал сотрудничать с ОКБМ по БР в 1961 г., когда Директором-Главным конструктором (ДГК) организации был И.И.Африкантов. Для нас, молодых специалистов, это был романтический период работы по БР благодаря личностям Главного Конструктора Игоря Ивановича Африкантова и Научного руководителя проблемы Александра Ильича Лейпунского и, возможно, наступившему периоду «оттепели» в жизни страны. Находилось в зените сотрудничество ОКБМ—ФЭИ, каждое стоящее решение оперативно обсуждалось и принималось дуэтом ГК-НР. С назначением на должность ДГК Федора Михайловича Митенкова в 1969 г., сразу проявилось усиление организационного начала в руководстве предприятием, получила дальнейшее развитие персонифицирование ответственности, НОТ. Помню, приехал в командировку, нахожусь в выгородке начальника КО, звонок, опрометчиво поднимаю трубку, отвечаю: начальник КО вышел, не знаю куда — и.. слышу недовольство ДГК за потерю им рабочего времени на «заслушивание» (трубку не стоило поднимать). Руководителем предприятия он стал сразу, чувствовалось, что высочайшая ответственность его не пугает, что он давно к ней готов. Эксперименту, подтверждающему расчеты и конструкторские решения, отдается приоритет. Принцип нового ДГК: «Я должен видеть, как гвоздь вошел в доску», — имел немалое значение для развития экспериментальной базы и успеха БР в стране. При обсуждении сложных вопросов в нем присутствуют холодный расчет и опыт, ему свойственна жажда достижений, он бескомпромиссен в достижении цели. Такими людьми ковалась мощь советской сверхдержавы. Но прекрасно, что при всем этом он не стал односторонним человеком. Интерес к разносторонней жизни — одно из его важных качеств. Во время двух служебных командировок ФММ в МАГАТЭ я имел возможность часто общаться с ним, — философия, история, экономика, искусство, спорт, а не только наука, — круг его интересов. Тут вспомнилась фраза, сказанная им однажды на совещании в ОКБМ: «Когда случается бессонница, — беру томик Канта». Из общения понял, что к философии у него живет интерес отнюдь не только во время бессонницы.

В советские годы в ОКБМ существовала глубочайшая преданность руководству, мерой ума и даровитости сотрудника служило в том числе и отношение его к начальству⁵. И в этом нет ничего постыдного, если у тебя начальники под стать И.И. Африкантову, Е.Н. Черномордику, В.И. Ширяеву и им подобным. Может быть, уместен здесь будет такой эпизод. В одной из командировок во Францию я был старшим группы советских специалистов и, обсуждая в номере гостиницы (глубоким шепотом) один из пунктов будущей программы сотрудничества, касающийся ОКБМ, услышал от представителя ОКБМ вопрос-сомнение: «А как на это посмотрит – (пауза, реальное имя произносить ни в коем случае нельзя даже шепотом, – и... было произнесено кем-то) – Достоевский?». Так ФММ – дважды тезка великого писателя спонтанно был наречен знаменитым псевдонимом, разгадать который было не под силу никаким зарубежным спецслужбам.

Однако – про «батальоны» (см. эпиграф). ОКБМ всегда славилось их достаточностью, высокой инженерной культурой своего состава, глубоким пониманием предмета, высокой ответственностью в решении задачи расчетными, конструкторскими и экспериментальными подразделениями. Недостаток места не позволяет привести много примеров, ограничусь лишь двумя.

После изготовления напорной камеры реактора БН-350 на ЗИО (г.Подольск) встал вопрос ее промывки. Вода была нежелательна из-за наличия в изделии глухих полостей, что чревато было межкристаллитной коррозией (мкк) при последующем контакте натрия с водой. Сушка нагревом также была нежелательна из-за мкк в нержавеющей стали. Предлагался спирт. Директор завода А.П.Долгий настаивает на воде, приводя В.В.Пахомову (ОКБМ) «убийственный» аргумент: спирт (~6 тонн, 4-е ГУ было готово поставить) в изделие не попадет, весь завод будет пьян; и «...сколько реакторов завод не изготавливал, все вначале были на натрии, а потом оказывается, что все работают на воде, что ожидает и БН-350». Владимир Васильевич был шокирован заявлением, но настоял на приемлемом решении⁶. Уже потом стало известно, что одной из причин трещин в БОС СФ и двухлетней остановки этой АЭС явилась именно водная промывка барабана.

⁵ Прочувствовал это при обсуждении отзыва ОКБМ на мою докторскую диссертацию: авторитеты и предприятия, и Руководства сотрудниками блюлись бескомпромиссно

⁶ Отмечу, что конструкторы парогенераторов БН-350 (ОКБ ГП) не убедили завод отказаться от холодной штамповки доннышек трубок испарителей, что, как известно из-за течей ПГ, повлекло большие финансовые потери и отсрочило пуск реактора почти на два года

При запуске циркуляции натрия первого контура реактора БН-350 один ГЦН работал с перебоями: пульсация расхода, вибрация. Комиссия во главе с В.И. Костиным (ОКБМ) на основе анализа сделала вывод, что с насосом все в порядке, и заключила, что напорный патрубок насоса перекрыт посторонним предметом, и настояла на сложной операции — сливе из петли десятков тонн натрия и извлечении насоса из контура. Выводы подтвердились, — при демонтаже была обнаружена забытая монтажниками заглушка. Этот инцидент всплыл на совещании у начальника 4-го ГУ МСМ А.Д. Зверева, который вслух восхитился работой конструкторов, на что В.И. Ширяев о Виталии Ивановиче Костине сказал: «Конструктор от Бога».

Несколько слов о будущих разработках. Безопасность трех направлений реакторов: водо-, газо- и натрийохлаждаемых обеспечивается по-разному. В реакторах с водой под давлением (PWR, ВВЭР) — в основном за счет огромных запасов воды внутри прочноплотной защитной оболочки и вне ее, что просто и сравнительно недорого; газоохлаждаемых — благодаря низкой теплонапряженности и, следовательно, большой теплоаккумулирующей способности активной зоны. При обеспечении безопасности и выполнении других требований, проектировщики БР идут по пути добавления специальных внешних натриевых систем аварийного расхолаживания и других систем, что и сложно и дорого. БР и его система транспорта тепловой энергии «обвязаны» почти полудюжиной внешних вспомогательных натриевых систем и элементов, разбросанных по различным помещениям, увеличивающих объем натрия и опасность течей и нарушающих принцип интегральности реактора. Загрузка в реактор сложного в обращении вещества, каким является натрий, и без этих систем непозволительно велика, — в 4–5 раз больше по сравнению с объемом воды в PWR. Проблему безопасности БР следует решать детерминированно, — за счет самозащищенности.

БР — единственный тип реактора, который: а — работает с давлением в корпусе реактора, близким к атмосферному, использует пластичные термостойкие стали, выдерживающие в аварийной ситуации значительное повышение температуры; б — имеет в активной зоне (на плотном топливе) $K_B \sim 1,0$ и, как следствие, минимальный запас реактивности, — на уровне 1β . Многие эксперты считают, что вполне возможно создание конструкции реактора на быстрых нейтронах, в котором при потере энергоснабжения ГЦН, отказе аварийной защиты (АЗ) и последующем разогреве до предельной температуры за счет удлинения штанг СУЗ, направленного от центра изгиба специально спроектированных ТВС, увеличения объема активной зоны и других формоизменений формировалась бы отрицательная реактивность,

обеспечивающая самопроизвольное снижение мощности реактора до значения, отводимого естественной циркуляцией теплоносителя. В этом направлении работают в США⁷, проведены успешные эксперименты на трех опытных БР: «Рапсодии» (Франция), EBR-II и FFTF (оба США) с отключением ГЦН и искусственным стопорением стержней АЗ.

Опасно останавливаться на достигнутом. («Как это мелко знать лишь то, что известно», — древний китайский философ Чжуан Цзын). О трудностях развития замечательно сказал Гегель в «Лекциях о всемирной истории»: «Развитие... есть не бесхитрое и безмятежное приотечение....., а яростнаяработа духа».

Россия, как никакая другая страна в мире, обладает бесценным научным, проектно-конструкторским и технологическим опытом и знаниями по быстрым реакторам-бридерам с натриевым теплоносителем. Страна в состоянии создавать современные энергоблоки с этими реакторами. В ОКР и НИР по направлению БР, включая строительство четырех реакторов, по оценкам академика Ф.М. Митенкова, в СССР/России вложено ~12 млрд⁸ дол. США [в мире без СССР — свыше 50 млрд дол. США⁹]. Известно, что только избранные предприятия в мире могут производить современные машины, например, самолеты. В атомном энергомашиностроении ОКБМ принадлежит к избранным.

⁷ WADE, D. C., Recent innovations in IFR safety research, Proceedings of ARS «94 International Topical Meeting on Advanced Reactor Safety, held in Pittsburgh, USA, 17–21 April 1994, sponsored by ANS, pp. 793-805.

⁸ Чтобы не сложилось ошибочное мнение, что успех освоения БР в СССР/России определился только объемом затрат на ОКР и НИР, отмечу, что, с моей точки зрения, решающим были разработанные ОКБМ образцы и представительные модели хорошо спроектированного оборудования, а также эффективные программы и методики испытаний. Я видел в Гренобле (Франция) большие (каких не было в ОКБМ) стенды с полномасштабными элементами теплообменников натрий-натрий, но, несмотря на это, последние неудовлетворительно работали на реакторе «Феникс».

⁹ MOUROGOV, V.M., JUHN P.-E., KUPITZ, J., RINEISKII, A.A., Liquid-metal-cooled fast reactors (LMFR) development and IAEA activities, Energy, V. 23, N 7/8, (1998), pp. 637-648.

Ф.М.Митенков – коллега и соратник

*Г.А. Гладков,
доктор технических наук, профессор*

В конце 50-х годов, когда ОКБМ приступило к самостоятельному проектированию АПЛ второго поколения, И.И. Африкантов решил, что его организация должна уметь рассчитывать физику атомных реакторов. Поэтому он взял выпускников МИФИ (О.Б. Самойлов, В.А. Будников) и создал отдел, который, в основном, занимался теплотехническими расчетами, включив в него инженеров-физиков для расчетов активной зоны и биологической защиты. Сначала этим отделом руководил специалист-гидравлик, но затем произошла смена руководства. Тогда на эту должность был назначен Ф.М. Митенков, который ранее этими вопросами не занимался. Но, как сейчас я понимаю, превосходная математическая подготовка и отличные природные способности позволили ему быстро освоить премудрости физических расчетов. Это произошло настолько быстро, что я, который очень тесно взаимодействовал с ОКБМ, в первую очередь по части расчетов, даже не заметил этого. Федора Михайловича я увидел как специалиста, превосходно разбирающегося в вопросах физики, гидравлики, прочности, то есть по всем проблемам, которые возникают при проектировании атомного реактора.

Это привело к тому, что началось тесное взаимодействие между нашими физиками-расчетчиками и физиками ОКБМ. В ряде случаев мы эти расчеты вели совместно, иногда они выполнялись параллельно. Постепенно проведение физических расчетов активных зон стало переходить в ОКБМ. Ф.М. Митенков активно участвовал в этих работах и лично дал ряд интересных предложений по структуре и органам регулирования активных зон. Он довольно быстро написал и защитил на основании работ по реактору докторскую диссертацию. Вскоре после этого он стал заместителем начальника ОКБМ по научной работе. Здесь он активно участвовал в создании критической

сборки для выполнения экспериментов по активной зоне. Наши сотрудники помогали ОКБМ в этой работе. Она оказалась очень полезной, так как опыты на критсборках существенно помогали ОКБМ в отработке активных зон для серийных реакторов. Важно было создание группы программистов, которые могли проводить расчеты на ЭВМ. Это помогло ОКБМ освоить новейшие программы расчета активных зон ядерных реакторов, биологической защиты и теплогидравлики сначала наших, а затем и ФЭИ по жидкометаллических реакторов, создаваемых совместно с ФЭИ.

Все эти работы Ф.М. Митенков активно продолжил после назначения его главой ОКБМ в 1969 г. Он способствовал их развитию, а также приложил усилия (вместе с сотрудниками) для оснащения ОКБМ современными ЭВМ, что дало возможность создавать новые сложные программы расчета ядерных реакторов.

Конечно, у Федора Михайловича возникло много новых работ. И новые реакторные установки с жидкометаллическим теплоносителем, и создание реакторов для энергетики, и, конечно, многочисленные заботы по развитию ОКБМ, что требовало от него больших усилий. Следует отметить, что после того, как Ф.М. Митенков стал директором, наши совместные работы не ушли из его поля зрения полностью. При моих поездках в ОКБМ мы очень часто обсуждали с ним общие стратегические вопросы развития водо-водяных реакторов. Неоднократно мы вместе с сотрудниками ОКБМ собирались у него в кабинете за большим столом и рассматривали решения отдельных задач. Причем Ф.М. Митенков, несмотря на большую занятость, не жалел времени на обсуждение важных для нас вопросов.

Особенно интенсивно мы работали, когда складывался облик энергетической установки для АПЛ третьего поколения. Отмечу, что к этому времени в ОКБМ выросли великолепные сотрудники, которые могли самостоятельно решать поставленные задачи. Они взяли на себя ввод в действие и отработку энергетических установок 3-го поколения. Я совместно с Федором Михайловичем почти в каждый свой приезд обсуждал узловые проблемы развития водо-водяных установок для флота. Причем это не было командно-инженерным мероприятием. Ряд проблем обсуждался и рассматривался очень глубоко вплоть до понимания того, что надо еще дополнительно рассмотреть, обсчитать и сделать. Мы не ограничивались только вопросами создания проектируемых установок. Ф.М. Митенков — человек очень начитанный и эрудированный, и поэтому я с большим удовольствием вел с ним беседы и по абстрактным идеям. В это время в ОКБМ под руководством Ф.М. Митенкова развивались

многие реакторные направления, из которых наиболее продвинутыми оказались жидкометаллические реакторы и станции теплоснабжения.

Очень важным в деятельности Ф.М. Митенкова являлась его работа в Горьковском Политехническом институте. Соответствующую специальность, которая должна была питать ОКБМ молодыми кадрами, создал еще И.И. Африкантов. Но Федор Михайлович существенно расширил выпуск специалистов по необходимым ему профилям. Он не остановился на этом и создал на факультете диссертационный Совет, который присуждал ученые степени и сыграл очень большую роль в подготовке для ОКБМ научных сотрудников, имеющих ученые степени кандидатов и докторов наук. Эти кадры становились руководителями по соответствующим направлениям работ в ОКБМ, что позволило резко усилить научную часть его работ и выйти на совершенно новый уровень решения производственных проблем с точки зрения их постановки и осуществления.

Надо еще отметить, что Федор Михайлович находит желание и время для занятий спортом. О его успехах в этой области я узнавал от его помощников во время обеденного перерыва. Эта сторона деятельности тоже важна, так как Федор Михайлович, подходя к своему 80-летнему юбилею, весьма активен в научной и педагогической деятельности.

Наставник и Учитель

Г.Б. Усынин, профессор НГТУ

В 1958 г. вместе с группой выпускников физмата Горьковского государственного университета (ГГУ) я прибыл по распределению на работу в конструкторское бюро машиностроительного завода. Оно располагалось в помещениях знаменитого артиллерийского КБ главного конструктора В.Г. Грабина. В группе расчетчиков, занимавшихся самыми различными вопросами, связанными с разработкой новой техники, выделялся выпускник Саратовского университета Ф.М. Митенков. Расчетчики-прочности, теплогидравлики и другие помещались в одной небольшой комнате. Единственными их рабочими инструментами были логарифмические линейки и справочники.

К моменту нашего прихода тематика работ ОКБ интенсивно расширялась, начиналось проектирование энергетических ядерных реакторов различного назначения. Расчетчики стали заниматься текущими вопросами биологической защиты ЯЭУ. Нейтронно-физические расчеты выполнялись в других организациях – Лаборатории «В», Лаборатории измерительных приборов (ЛИПАН), – так они назывались по документам. Дальновидная политика руководителя ОКБ И.И. Африкантова привела к строительству на отдельной территории мощной организации – ОКБМ со специализированными конструкторскими и расчетными подразделениями, а также с собственной расчетно-экспериментальной базой. Организацию физического расчетного отдела руководство поручило молодому кандидату технических наук Ф.М. Митенкову. В рамках отдела были выделены группы по направлениям. Федор Михайлович поручил мне заниматься нейтронно-физическими расчетами реактора на быстрых нейтронах. Несколько девушек-техников в комнате, обитой звукоизолирующей тканью, с помощью электромеханических машинок «Рейнметалл» заполняли цифрами большие бумажные «простыни», – считались ядерные константы и многогрупповые потоки нейтронов.

В начале 60-х годов в ОКБМ появились первые электронно-вычислительные машины. В отдел Ф.М. Митенкова пришли на работу

математики-программисты, специалисты других профилей. Кроме текущего обслуживания конструкторских работ, в отделе № 10 стали выполняться исследовательские работы на перспективу. Все большую роль в планах отдела стало занимать сопровождение пуска наладочных работ. Авторитет отдела и его руководителя возрастал.

Расширение объема работ обострило проблему кадров. Государственное распределение выпускников из МВТУ, МИФИ, МЭИ оказалось малоэффективным. Большая часть молодых специалистов, отработав небольшой срок, отбывала назад, в Москву. Решено было организовать подготовку инженеров-физиков на месте, в Горьковском политехническом институте. В этом вопросе И.И. Африкантов нашел поддержку в Обкоме КПСС, у академиков А.И. Лейпунского и А.П. Александрова. Часть студентов IV курса кораблестроительного факультета часть была переведена на вновь образованный физико-технический факультет. На нем вначале было три кафедры. Специальные кафедры № 3 и № 2 возглавляли по совместительству доктор технических наук И.И. Африкантов и кандидат технических наук Ф.М. Митенков. К преподавательской работе были привлечены также по совместительству ведущие специалисты ОКБМ: Е.Н. Черномордик, Н.М. Царев, А.И. Макаров, М.В. Смирнов. После получения диплома кандидата физико-математических наук в 1967 г. я также был приглашен на работу по совместительству на кафедру, возглавляемую Ф.М. Митенковым.

Создавалась материальная база учебного процесса. Создание учебных лабораторий ядерной физики, физики реакторов, физики защиты и радиационной безопасности — заслуга Ф.М. Митенкова. За основу им были взяты соответствующие лабораторные практикумы спецкафедр МИФИ. Много хлопот было с созданием хранилища нейтронных и гамма-источников, лифтового хозяйства. В разработку первых учебных планов с ориентацией на солидную общую физико-механическую и специальную подготовку по профилю немалую долю вложил Ф.М. Митенков. Текущую учебно-методическую нагрузку на кафедре № 2 выполнял небольшой коллектив постоянных (не совместителей) преподавателей и сотрудников, подобранный Ф.М. Митенковым. Часть из них до сих пор работает на кафедре ЯР и ЭУ (кандидат технических наук В.А. Чирков, доцент Е.А. Шлохин, инженер А.Н. Молокосов).

Кроме материальной базы, разрабатывались и издавались учебные пособия. До сих пор в ходу у студентов книга И.И. Африкантова и Ф.М. Митенкова «Ядерные судовые паропроизводящие установки», учебные пособия, написанные совместно с Б.И. Моторовым и другими сотрудниками предприятия и факультета.

В июле 1969 г. Ф.М. Митенков возглавил ОКБМ. Это стало началом нового этапа в работе предприятия. Подробно об этом рассказывается

в других разделах книги, я остановлюсь только на некоторых эпизодах, связанных с этим периодом, запомнившимся мне.

Во время работы пусковых комиссий реактора БН-350 в г.Шевченко (Актау) мне доводилось встречаться с Федором Михайловичем на совещаниях, которые проводил заместитель министра А.Д. Зверев. Совещания проходили в довольно жесткой форме, сохранившейся со времен создания первых предприятий атомной промышленности. Допускались только четкие и конкретные ответы по обсуждавшемуся вопросу, вся ответственность за которые ложилась на выступающего. В этой обстановке Ф.М. достойно представлял ОКБМ. Каких-либо серьезных отказов при пуске уникального первого в мире промышленного реактора на быстрых нейтронах в части оборудования, разработанного ОКБМ, не было. Во многом это было следствием традиции ОКБМ, поддерживаемой Федором Михайловичем, — проверять наиболее ответственные конструкторские решения на стендах предприятия, доводя по возможности испытания до ресурсных.

Запомнились также периодические совещания в кабинете Главного конструктора своей деловитостью и демократичностью. Приглашались на них не только руководители подразделений, но и непосредственные исполнители. Выслушивались все, кто мог сказать что-либо дельное по существу.

Будучи начальником отдела и впоследствии, став руководителем предприятия, Ф.М. Митенков всегда подавал пример сотрудникам, систематически занимаясь спортом. Занятия волейболом сменялись еженедельными лыжными походами. В течение многих лет я встречал на лыжной трассе Зеленый Город — Щелковский Хутор либо одного Федора Михайловича, либо вместе со своими заместителями Е.Н. Черномордиком и К.К. Грязновым. Затем эти встречи прекратились — походы были перенесены на базу отдыха ОКБМ.

Еще об одной стороне деятельности мне хотелось бы упомянуть. В настоящее время Ф.М.Митенков возглавляет специализированный Ученый Совет по защите диссертаций на физтехе НГТУ. Мне приходилось быть членом подобных советов в других городах, участвовать в работе многих советов в качестве оппонента. Скажу, что Совет, возглавляемый Ф.М.Митенковым, выглядит среди них весьма достойно. Он отличался тщательной предварительной экспертизой работ соискателей, объективным и благожелательным разбором материалов, представленных к защите. И всегда обобщающая заключительная речь Федора Михайловича ярко отражает главные моменты прошедшей дискуссии. Об авторитете Совета свидетельствует то, что много диссертационных работ приходит из ведущих научных центров отрасли (НИИАР, ФЭИ, РНЦ КИ) и атомных станций.

Ф.М. Митенков и Нижегородский политехнический университет

*А.В. Безносков,
доктор технических наук, профессор НГТУ,
Заслуженный деятель науки Российской Федерации*

Думаю, что трудно переоценить роль Федора Михайловича Митенкова в подготовке и становлении кадров атомной промышленности — как Горьковско-Нижегородской, так и отечественной.

Помню, как в 1962–1963 учебном году к нам на занятия (а мы были первой выпускной группой Физтеха Горьковского политеха) пришел Ф.М. Митенков, сотрудник КБ И.И. Африкантова, который также читал нам лекции.

Не помню точно название курса, который преподавал Федор Михайлович, но точно помню, что он был связан с физикой ядерных реакторов. Мы были ошарашены количеством и «размерами» формул, которые запросто и походя писал на доске наш лектор. По-моему, наряду с исключительными интеллектом, эрудицией и другими приобретенными качествами, Федор Михайлович обладает природным «от бога» талантом объяснять достаточно сложные мысли, физические и математические построения, доводя их до понимания слушателей, даже таких неподготовленных какими мы тогда были.

Несколько тысяч выпускников Физико-технического факультета нашего университета, работающих в России, да и не только в России, по жизни несут этот «заряд», умение формулировать методику подхода к решению задач, которые ставит жизнь. И не обязательно, чтобы это были задачи именно атомной энергетики. По моему мнению, основная задача вуза — это не столько сформировать «узкого» специалиста, сколько — мыслящую личность, способную адекватно и эффективно адаптироваться к изменяющимся внешним условиям. Как мне сказала наша выпускница (руководитель одного из нижегородских банков): «Мне Физтех здорово «прочистил мозги».

Роль Федора Михайловича в формировании таких личностей очень значима.

Последующие более чем пятнадцать лет я встречался с Ф.М. Митенковым, будучи сотрудником ОКБМ, согласовывая, подписывая разработанные мною документы, когда Федор Михайлович был вначале начальником отдела, заместителем руководителя, а позднее руководителем предприятия. Такие встречи чем-то напоминали экзамен, безусловно, способствуя профессиональному росту сотрудника.

После перехода из ОКБМ на Физико-технический факультет я принимал участие в работе двух Советов по защите кандидатских, затем докторских и кандидатских диссертаций под руководством Федора Михайловича вначале в качестве ученого секретаря, а позднее – заместителя председателя Советов. Отличительной чертой нашего председателя всегда было требование неукоснительно соблюдать все нормативные документы при подготовке к защите, собственно защите диссертаций и при оформлении соответствующих документов. Из всех диссертационных Советов различных предприятий, на которых я был, наши Советы были и остаются, как мне кажется, самыми организованными и дисциплинированными – таков стиль академика Ф.М. Митенкова. На каждом заседании наш председатель после завершения дискуссии подводил итоги защиты. Меня всегда восхищала способность Федора Михайловича глубоко анализировать самые различные темы защищаемых диссертаций, его эрудиция, способность выделить в работе главное, проанализировать это главное и сделать обоснованные, объективные выводы. Интересно то, что в тех случаях, когда защищаемая работа Федору Михайловичу нравилась, он всегда говорил, что будет ее поддерживать, голосовать за нее. Когда же считал, что работа не заслуживает присуждения искомой степени, он таких слов не говорил.

Мне хочется еще отметить то, что Федор Михайлович, будучи руководителем ОКБМ, абсолютно справедливо считал, что многие специалисты ОКБМ заслуживают присуждения ученых степеней. И, несмотря на «отчаянное» сопротивление подчиненных, он заставил соответствующих сотрудников сдать экзамены кандидатского минимума и защитить кандидатские и докторские диссертации. К сожалению, с его уходом с должности руководителя ОКБМ созданная в ОКБМ система аттестации, система защиты диссертаций начала постепенно разрушаться.

Хочется пожелать Федору Михайловичу здоровья, успехов, длительной работы для нас, прежде всего, совместной работы на нашей кафедре и в наших диссертационных Советах.

Из воспоминаний о совместной работе с Ф.М. Митенковым

*Я.Д. Арефьев, контр-адмирал
лауреат Государственной премии СССР,
доктор технических наук, профессор 1 ЦНИИ МО РФ*

С большим удовлетворением я принял предложение руководства ОКБМ написать воспоминания о совместной работе с Федором Михайловичем Митенковым прежде всего потому, что он более 50 лет своей жизни и деятельности посвятил укреплению обороноспособности страны и в том числе созданию высококлассной атомной энергетики для атомных подводных лодок и надводных кораблей отечественного Флота.

За большие достижения в этой области он удостоен звания Героя Социалистического Труда и самых высоких научных степеней и званий, избран действительным членом АН СССР (ныне РАН), а также награжден многими государственными наградами. В этом году он был удостоен одной из самых престижных премий в области энергетики. Еще одной причиной, побудившей меня взяться за перо и обратиться к воспоминаниям, является тот факт, что и Федор Михайлович, и я родились почти в одно и то же время. Он в ноябре 1924 г., а я — в ноябре 1923 г. И оба мы принадлежим к тому поколению советских людей, которые в 1941–1945 годах оказались в самом пекле кровавой войны с фашистской Германией. Я это упоминаю потому, что по статистике девять из каждых десяти наших сверстников, родившихся в 1923–1924 годах, участников Великой Отечественной войны, погибли на полях сражений или в морских глубинах.

Наше поколение граждан СССР в возрасте 17–18 лет оказалось брошенным в «военную мясорубку» прямо со школьной скамьи, не имея практически необходимой военной подготовки.

Единственное, чем мы, пожалуй, обладали, — это воспитанием в духе беспредельной преданности Родине и готовности отдать все свои силы делу защиты Отечества и укреплению государства.

Указанные обстоятельства наложили на нас, оставшихся в живых сверстников нашего поколения, неодолимое стремление отдавать все свои силы и знания служению Отечеству не только за себя, но и за тех парней, которые сложили свои головы на полях сражений в Великой Отечественной войне. И наконец, еще одно обстоятельство, приведшее меня к необходимости написания этих строк, — это общность задач, которые нам надо было совместно решать для обеспечения поставок атомных энергетических установок на строившиеся подводные лодки и надводные корабли нескольких кораблестроительных программ второй половины прошлого столетия.

Первое наше знакомство и совместное решение задач обеспечения разработок и поставок корабельной атомной энергетики состоялось в начале 60-х годов прошлого столетия, когда широким фронтом разворачивались работы по созданию реакторных паропроизводящих установок второго поколения.

По программе шестидесятых годов предполагалось создавать несколько проектов. Для каждого из них требовались различные мощности и своя паропроизводящая установка. Как раз в то время нами совместно с ЦКБ-проектантами ПЛА и ОКБМ была изучена возможность создания единой, максимально унифицированной ППУ. Реализация такого решения давала большую экономию и обеспечивала высокую стандартизацию и унификацию поставок, а также лучшие условия отработки и доводки установок.

В конечном итоге возможность решения этой задачи определялась ОКБМ. И.И. Африкантов, в то время начальника ОКБМ, и Ф.М. Митенков, в то время начальник расчетного отдела, оперативно организовали проектные проработки и провели необходимые расчеты, по результатам которых это предложение пошло в реализацию.

ЦКБ-проектанты и базовая организация Гензаказчика подготовили и оформили в установленном порядке соответствующие технические задания и договора на разработку унифицированных установок. Федор Михайлович вместе со своим коллективом, не дожидаясь окончания оформления договорной документации, организовал выполнение многих расчетных проработок и подготовил необходимые материалы для рассмотрения их на НТС МСМ. Выступал с докладом на этом Совете, а мне довелось выступать по этим вопросам в качестве оппонента от Гензаказчика.

В большинстве случаев по рассматриваемым вопросам мы находили согласованные решения и обрабатывали соответствующие

рекомендации. Но были иногда и серьезные разногласия, которые всегда успешно разрешал Председатель Научно-технического совета академик Анатолий Петрович Александров, мудрый и необыкновенно талантливый научный руководитель всех разработок в области атомной энергетики.

Принятое решение по созданию унифицированных ППУ второго поколения только за счет прекращения работ по одной из тем дало большую экономию государственных средств. К моменту разработки всех паропроизводящих установок второго поколения уже накопился значительный опыт эксплуатации атомных подводных лодок первого поколения. В частности, их опытная эксплуатация, в которой мне довелось участвовать, в том числе и в длительном автономном подледном походе, вскрыла целый ряд недостатков их реакторных установок, которые необходимо было не допустить на ПЛА второго поколения.

Анализ всех обобщений опыта эксплуатации, которые проводились разработчиками ППУ, проектантами ПЛА и базовой организации Гензаказчика позволил сформировать целый комплекс работ, которые необходимо было выполнить, чтобы решить проблему обеспечения надежности АЭУ второго поколения. Далее остановлюсь на тех из них, которые были связаны непосредственно с совместными работами ОКБМ и нашего института.

Предварительно отмечу, что в атомной энергетике, в отличие от всех прежних типов корабельных энергетических установок, затруднен или практически исключается доступ к оборудованию из-за ионизирующих излучений, имеет место высокая быстротечность физических процессов, процессов теплообмена в контурах АЭУ, особенно в аварийных ситуациях, затруднено размещение приборов контроля параметров и имеется ряд других хорошо известных особенностей АЭУ.

Все это потребовало тщательного изучения динамики АЭУ, разработки мероприятий по максимальному использованию саморегулирования процессов, включая использование естественной циркуляции в теплообменных контурах, тщательной отработки алгоритмов управления установкой и др.

Поэтому еще для первого поколения начались глубокие исследования динамики работы АЭУ с тщательными расчетами изменения параметров во времени при различных нормальных и аварийных переходных режимах в наиболее информативных точках контуров.

В ОКБМ эту работу возглавил Ф.М. Митенков, который привлек к решению поставленной задачи многих талантливых специалистов, добился создания мощной лаборатории электронно-вычислительной техники.

Такая же работа, особенно в части обоснования требований ВМФ, была развернута и в нашем институте.

Мы обменивались результатами исследований, выясняли причины возникавших иногда расхождений результатов, и в конечном итоге находили наиболее правильные решения с точки зрения построения схем установок и систем управления с максимальным сокращением количества регулируемых параметров.

В отдельных случаях мы проводили совместные работы и оформляли их подписями специалистов ОКБМ и нашего института.

В некоторых направлениях работ мы брали инициативу на себя. Так было, например, с исследованиями обеспечения ударостойкости корабельного оборудования.

Дело в том, что мы имели специально оборудованную базу, на которой можно было испытывать практически все виды корабельного оборудования при воздействии взрывов.

Федор Михайлович принял активное участие в создании такого стенда для ППУ с монтажом на нем всех основных типов штатного оборудования. На первой стадии этих работ не все специалисты однозначно поддержали это начинание. Однако в последующем все заинтересованные предприятия и организации одобрили проведение этих испытаний для большинства типов оборудования. Эти испытания, кроме всего прочего, позволили отработать методики расчетов равнопрочных конструкций ППУ, циркуляционной трассы и другой корабельной техники.

Целесообразность проведенных работ по обеспечению взрывостойкости оборудования стала особенно ясной после трагедии на ПЛА «Курск», когда все прочноплотные конструкции ППУ третьего поколения выдержали мощнейший взрыв, сохранив герметичность и исключив выход радиоактивности во внешнюю среду. Конструкция этой ППУ была рассчитана по методике, разработанной с учетом экспериментальных исследований ударостойкости оборудования, в том числе и оборудования третьего поколения.

Здесь представляется также необходимым отметить активное участие Федора Михайловича в разработке норм расчетов на прочность реакторных установок с учетом всех видов внешних воздействий. Эти нормы разрабатывались НИКИЭТ с участием многих заинтересованных предприятий, были введены в действие в установленном порядке и стали обязательными для всех проектантов реакторных установок.

Следует, по-видимому, еще раз обратить внимание на то, что некоторые вопросы, очень важные как для исполнителя работ, так и для заказчика с точки зрения исходных данных для проектирования в ряде случаев не находили полного взаимопонимания. Так было,

например, с моделями эксплуатации АЭУ. Когда встал вопрос о причинах преждевременных отказов отдельных элементов и оборудования АЭУ, ОКБМ предъявило заказчику претензию в части задания некоторых моделей эксплуатации, которые не всегда соответствовали фактическим. Действительно, такие расхождения возникали, но они были связаны с определенными отклонениями от плановых режимов эксплуатации, в том числе и по причинам аварийных выходов из строя отдельных видов оборудования и их плановых ремонтов, изменения графиков боевой службы и учебных задач. Наиболее приемлемым для обеих сторон выходом из этой ситуации была необходимость более тщательной вероятностной оценки эксплуатационных моделей и включения в ТЗ расширенных диапазонов возможных режимов работы с ориентацией на более напряженные возможные режимы. Так это и стало приниматься в новых требованиях заказчика и при согласовании тактико-технических заданий на вновь разрабатываемые установки.

С большим удовлетворением хочется отметить, что Федор Михайлович принадлежит к категории главных конструкторов-разработчиков военной техники, которые хорошо знают запросы заказчика, а в ходе эксплуатации техники тщательно анализируют условия работы и возможности ее совершенствования, а также всячески содействуют личному составу флота в ликвидации аварий и поломок в целях обеспечения выполнения задач, стоящих перед морями.

Вспоминается ситуация, возникшая на Северном Флоте в семидесятых годах прошлого столетия. Одна из подлодок второго поколения должна была совершить длительный поход, но перед самым выходом ПЛА в море с Флота пришел доклад о попадании забортной воды в «подблочное пространство» реакторного отсека. Чтобы расследовать эту ситуацию, непосредственно на ПЛА была назначена комиссия в составе представителей ЦКБ-проектанта, ОКБМ, ЦНИИМС и других предприятий. От Заказчика в комиссию был назначен автор этих строк. Федор Михайлович организовал всю необходимую работу в подразделениях ОКБМ по исследованию возможных последствий происшедшего и выработке мероприятий по обеспечению надежной работы установки.

Естественно, что с позиции главного конструктора, да и нашей тоже, самым верным путем обеспечения надежной работы ППУ была бы полная замена пострадавших участков труб. Но такое решение не вписывалось в запланированный график похода ПЛА и командование Флота обратилось к комиссии с просьбой изыскать возможность решения задачи восстановления работоспособности паропроизводящей установки в более короткие сроки.

Получив с Флота необходимую информацию, согласованную с комиссией, ОКБМ разработало и согласовало с ЦНИИМС специальные рекомендации по обеспечению достаточно длительной работоспособности ППУ. Эти рекомендации и соответствующие мероприятия были рассмотрены и согласованы комиссией, после чего реализованы на объекте. По завершении всех этих работ ПЛА вышла в море и благополучно совершила запланированный поход.

Достойны воспоминаний еще многие и многие ситуации в нашей совместной работе по созданию, отработке и обеспечению эксплуатации ПЛА всех поколений. По-видимому, в самое ближайшее время соответствующие авторские коллективы более подробно займутся этим для того, чтобы драгоценный опыт строительства и эксплуатации атомных подводных лодок и надводных кораблей с АЭУ в прошлом веке не канул в архивах в вечность.

А здесь хочется вспомнить одну из наиболее трудных совместных работ, связанных с крупными достижениями в кораблестроении. Речь идет о создании опытной автоматизированной ПЛА. Предварительно следует отметить, что Федор Михайлович сумел сохранить и укрепить блестящий коллектив главных конструкторов, созданный в ОКБМ еще в пятидесятых—шестидесятых годах прошлого столетия. С большинством из них нам вместе приходилось работать, в том числе и непосредственно на объектах, и я смог убедиться в умелой организации работы руководства ОКБМ с главными конструкторами установок.

Работа по созданию ППУ опытной автоматизированной ПЛА была начата в ОКБМ еще под руководством И.И. Африкантова, и первоначально она шла в двух известных вариантах. Было выполнено множество проработок обоих вариантов, но окончательное решение по выбору варианта состоялось в ходе работы макетной комиссии, которую возглавлял Л.Г. Осипенко, а его заместителями были И.И. Африкантов и автор этих строк.

К большому сожалению, в период развертывания работ по проектированию новой ППУ И.И. Африкантов ушел из жизни. Эту сложнейшую работу продолжили Ф.М. Митенков и Н.М. Царев.

«Опуская детали и подробности результатов анализа «бесконечного количества проработок с размещением макетов оборудования в отсеке, укажем на то, что в отведенном объеме отсека, в конце концов, удалось разместить лишь ППУ с ЖМТ, которая и была (после рассмотрения на НТС предприятий и МСМ) принята для дальнейшей разработки. Работа над этим проектом из-за малых объемов, отведенных для комплектующего оборудования и систем, была чрезвычайно сложной. Часто возникали вопросы с переделками размещения

и необходимостью уменьшения «насколько можно» объемов и массы отдельных конструкций или блоков.

Федору Михайловичу и Николаю Михайловичу довелось руководить беспрецедентно сложной работой по необычайно «плотной упаковке» оборудования в отсеке, а руководству комиссии постоянно вместе со специалистами заинтересованных ведомств и членами комиссии приходилось отыскивать «узкие места», добиваясь улучшения доступа к оборудованию и решать эти вопросы с главными конструкторами комплектующих систем и оборудования.

Я с удовлетворением могу отметить, что, в конце концов, Ф.М. Митенков, как директор и генеральный конструктор ОКБМ, и Н.М. Царев, как главный конструктор ППУ, вместе со своими специалистами высочайшей квалификации с этой необычайно трудной задачей успешно справились при самом активном участии в этой работе специалистов ЦКБ-проектанта и других участников создания этой уникальной ПЛА. В ходе всех работ по этому проекту было множество вопросов, которые приходилось решать в постоянной борьбе за каждый килограмм массы и каждый кубик объема, как в ходе проектирования, так и в ходе строительства объекта.

Вспоминается, что в ходе строительства ПЛА на судостроительном заводе для оперативного руководства и принятия необходимых научно-технических решений была назначена группа специалистов в составе В.С. Харитонова, Р.И. Симонова (от МСП), Н.М. Царева (от МСМ) и автора этих строк (от Гензаказчика). Эта группа была по существу научно-техническим советом, которому с привлечением всех необходимых специалистов контрагентов было доверено принимать необходимые технические решения в ходе строительства опытной ПЛА на месте.

Н.М. Царев как член этой группы и главный конструктор ППУ практически самостоятельно принимал большинство решений, но он постоянно поддерживал связь с Федором Михайловичем по наиболее важным проработкам и решениям по ним, особенно по тем, которые требовали соответствующих расчетов и проработок в подразделениях ОКБМ, а также оперативных исследований и испытаний отдельных комплектующих систем и оборудования.

Федор Михайлович оперативно готовил необходимые решения в подразделениях ОКБМ и выдавал соответствующие рекомендации. А принятие достаточно обоснованных решений по этому проекту было весьма и весьма сложно, особенно в случаях, связанных с аварийными ситуациями.

Вспомню лишь один пример по этому заказу, когда перед самым окончанием его строительства произошло запаривание отсека, приведшее к повреждению изоляции кабелей КСУ ТС.

Некоторые из участников строительства объекта стали предлагать наиболее простые варианты восстановления системы. Но Ф.М. Митенков был одним из тех, кто организовал и провел тщательный анализ возможных последствий происшедшего для ППУ. Вместе с СПМБМ «Малахит» и Заказчиком была обоснована необходимость восстановления не только всего объема кабельных трасс, но и необходимость повышения живучести КСУ ТС с соответствующими ее доработками. Это и было сделано. Последующая эксплуатация, в том числе и серийных объектов, полностью подтвердила правильность принятого решения.

Приведенные воспоминания относятся к разряду ситуаций, которые решались по «классическим канонам», исключающим отступление от требований Заказчика и требований проектной документации. Но в ходе строительства большого числа объектов были и такие случаи, которые требовали несколько иного подхода при принятии решений. Так было, например, в стадии окончания строительства опытной ПЛА малого водоизмещения. При практически полной готовности к испытаниям объекта вышла из строя одна из петель теплообмена ППУ. И при обычном подходе к принятию решения о допуске объекта к ходовым испытаниям не могло быть и речи.

Однако такое «классическое» решение в данном случае было связано со срывом работ многих поставщиков систем и комплектующих изделий, задержкой многих испытаний, подготовленных в соответствующих морских акваториях и в конечном итоге, задерживало выявление дефектов и недостатков многих комплектующих систем и изделий, а также и обработку заказа в целом.

Перед ОКБМ был поставлен вопрос, может ли оно гарантировать надежность и безопасность таких «недостаточно представительных» испытаний.

Проведенные в ОКБМ проработки всех возможных ситуаций в ходе предстоящих испытаний показали возможность их проведения с разработкой необходимых дополнительных мероприятий по обеспечению надежности и безопасности установки. Соответствующее решение было принято. К всеобщему удовлетворению испытания были успешно проведены, дав возможность испытать и отработать многие комплектующие системы и технические средства. А полный объем испытаний был проведен позднее на очередном заказе.

Переход к строительству атомных подводных лодок III поколения ознаменовался наиболее крупным научно-техническим успехом в создании корабельной атомной энергетики.

Для выбора установки III поколения был объявлен конкурс. Борьбу в этом научно-техническом соревновании выиграло ОКБМ.

Как пишут авторы книги «Полвека в атомном машиностроении» (Н. Новгород: КиТиздат, 1997, с. 117): «При разработке ППУ для АПЛ третьего поколения ставилась задача создания унифицированной блочной установки с мощностью реактора, вдвое превышающей мощность реактора установок второго поколения. При этом необходимо было обеспечить транспортабельность установки по железным дорогам страны...». Были также ужесточены требования по надежности, безопасности и другим эксплуатационным характеристикам.

Первоначальный вариант установки в основном соответствовал предъявленным требованиям. Но в ходе развернутого изготовления серийных образцов проявился ряд ее недостатков, в основном, технологического плана. Здесь необходимо отметить, что в создании усовершенствованных установок огромная заслуга принадлежит Ф.М. Митенкову, вступившему в должность директора ОКБМ в 1969 г. Причем его роль проявилась здесь не только как крупного руководителя и ученого, но и непосредственно как конструктора многих принципиально новых изделий, таких, например, как малогабаритный прямотрубный парогенератор.

Замечу, что однажды мне пришлось сопровождать А.П. Александрова и командование ВМФ при их посещении производственных участков, где изготавливались новые конструкции основных узлов установки. И я с удовольствием вспоминаю, как Федор Михайлович исключительно четко и доходчиво пояснял особенности новых конструкций и принципиально новой технологии изготовления прямотрубного парогенератора.

Здесь, вероятно, настала пора отметить еще и то, что Федор Михайлович с большим вниманием относился не только к крупным вопросам, но он еще был и остается отзывчивым в обыденных повседневных, как их иногда называют «мелких», вопросах.

Вспоминается, например, что однажды после приемки кинофильма, посвященного ППУ третьего поколения, которую провели мы вместе с Г.Ф. Носовым, возникла необходимость некоторой доработки фильма. По запросу кинорежиссера Федор Михайлович без промедления дал необходимые указания, и соответствующие мероприятия для доработки фильма были выполнены. Это позволило доработать и сдать фильм в установленные сроки.

Завершая эти строки, не могу не вспомнить еще одну область деятельности Федора Михайловича, в которой он провел огромную работу. Речь идет о его работе по подготовке научных и производственных кадров. Еще в 1962 г. при поддержке А.П. Александрова вместе с И.И. Африкантовым он добился организации Физико-технического факультета в Горьковском политехническом институте, ставшего

впоследствии основной кузницей кадров для ОКБМ и соответствующих производственных предприятий. Им был разработан и читался курс лекций по ядерным реакторным установкам.

Он умело сочетал научную, преподавательскую и производственную деятельность еще будучи начальником расчетного отдела, а затем заместителем главного конструктора ОКБМ по науке. Много работал он и в области подготовки научных кадров как среди специалистов ОКБМ, так и в ГПИ.

Особенно хочется отметить его активную работу по экспертизе диссертационных работ, а также его деятельность в Высшей аттестационной комиссии (ВАК СССР, а затем ВАК России).

Мне также довелось работать около 20 лет в Экспертном совете ВАК и проводить периодические проверки работы ученых Советов ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова, Ленинградского кораблестроительного института и др. И везде, где я знакомился с отзывами либо его самого, либо специалистов коллективов, которыми он руководил, все экспертные оценки давались на самом высоком научном уровне с тщательным, всесторонним рассмотрением докторских и кандидатских диссертаций. Насколько мне известно, Федор Михайлович эту деятельность по подготовке научных кадров активно продолжает и в настоящее время. Замечу также, что Федор Михайлович активно участвовал в подготовке научных кадров и для учебных заведений НИИ ВМФ.

Он всегда поддерживал и продолжает помогать флотским специалистам при подготовке ими диссертаций и издании книг и статей. Завершая эти воспоминания, еще раз хочу отметить огромную роль Федора Михайловича Митенкова в процессе создания во второй половине прошлого века атомных подводных лодок и надводных кораблей с атомной энергетикой, что обеспечило нашему государству создание мощного ракетно-ядерного Флота, способного решать адекватные времени задачи в любых районах Мирового Океана.

Хочется пожелать Федору Михайловичу в день восьмидесятилетия крепкого здоровья и дальнейших творческих успехов во всех сферах деятельности и в том числе продолжать работу по созданию и совершенствованию атомных энергетических установок для отечественного Военно-Морского Флота!

Наука убеждать

Никитин Л.Б.

Контр-адмирал в отставке

Федору Михайловичу, как должностному лицу ОКБМ, я был представлен в 1964 г. в группе командования АПЛ «К-43» (пр.670), на которую я имел честь быть назначен в качестве командира электромеханической боевой части (БЧ-V). Мы проходили обучение в ОКБМ, ГМЗ и на заводе «Красное Сормово». Меня сразу, во время небольшой беседы, поразила его глубокая сосредоточенность на предмете разговора, высокая инженерная осведомленность не только о ППУ, одним из творцов которой он был (и это было бы естественно), но и о проекте корабля в целом. Первое впечатление было сильным и верным, оно получило подтверждение в дальнейшем на многочисленных мероприятиях (Ученых Советах, совещаниях, конференциях и т.д.), на которых я присутствовал в качестве приглашенного лица или, иногда, докладчика. Меня просто поражала и завораживала глубина его проникновения в различные проблемы, решаемые на этих научных и инженерных сборищах. Его немногословность, постоянная серьезность, сосредоточенность, углубленность в себя, воспринимаемые некоторыми как замкнутость, неприветливость, я понял как следствие чувства высочайшей ответственности за каждое сказанное им слово в поддержку (или отрицание) людей, мнений, предложений, решений. Для меня стало совершенно очевидно, что Федор Михайлович тщательно готовится к этим совещаниям, «перемалывая» огромные количества полученной литературы, документов, результатов исследований.

Как пример, приведу такой случай.

В конце 1990-х годов Энергетическая комиссия РАН, членом которой Федор Михайлович являлся и на которую я был приглашен академиком Саркисовым А.А., рассматривала различные аспекты применения Рв в качестве теплоносителя в реакторах на быстрых

нейтронах. Обширный добротный доклад авторов (д.т.н. Орлов Ю.И. и др.), выступления в поддержку проекта, отсутствие явных «противников» проекта – все говорило о том, что проект, одним из авторов которого являлся тогдашний министр по атомной энергии (Адамов Е.О.), должен быть поддержан. Федор Михайлович, в отличие от некоторых членов ЭК и приглашенных, был очень напряжен, сосредоточен, внимателен к представленной «наглядной агитации». Видно было, что он чем-то озабочен. Вскоре он свою озабоченность высказал, высказал резко, прямолинейно и коротко, предложив отложить все решения по этому вопросу до полного исследования всех свойств теплоносителя и разработки технологии восстановления его качества в процессе эксплуатации (события, достаточно трагические, на АПЛ пр.645, связанные с нарушением именно такого подхода, присутствовавшие, по-видимому, хорошо помнили). В доказательство своей позиции он привел выдержку из труда немецкого (?) автора, датированную концом XIX века, в которой утверждалось, что при определенных условиях (высокая температура) свинец загорается. Федор Михайлович сказал: «Я не утверждаю, что это так, но исследовать все свойства свинца, заполнить все пробелы в этом вопросе мы обязаны» (может быть, я не совсем точно передаю его слова, как я их записал во время заседания, но за смысл сказанного я ручаюсь). При этом Ф.М.Митенков продемонстрировал «почтенному собранию» этот труд, внешне похожий на старинные рукописные издания летописей (где он нашел такой раритет? – загадка).

Вопросы докладчикам Федор Михайлович всегда задавал резкие, выверенные, лаконичные. Я бы даже сказал – образные. Отвечать на них, как правило, было трудно. На одном из Ученых Советов в МСМ, посвященном опыту эксплуатации ППУ АПЛ пр.705 и 705К, на котором я выступал с докладом по этой теме, он задал мне в очень жесткой форме вопрос: «Почему вместо опыта эксплуатации ППУ Вы рассказываете нам о недостатках водно-химического контроля в конденсатно-питательной системе?». Пришлось так же жестко и коротко ответить, что без надежного ВХР II контура бессмысленно говорить о надежности ППУ. Казалось бы, следовало ожидать недовольства со стороны Федора Михайловича, но он остался доволен: думаю, он хотел услышать такой ответ для подтверждения своей позиции в каком-то давнем противоречии с судостроителями.

Хочу пожелать всем сотрудникам ОКБМ учиться у старших товарищей и наставников целенаправленности, твердости позиций, уверенности в правоте и ответственности за все, что является предметом их умственной, научной и инженерной деятельности.

Содержание

Предисловие автора	5
Введение	7
Воспоминания	
Автобиографический очерк	9
О работе в ОКБ—ОКБМ	15
Первые шаги	15
О рабочей атмосфере в ОКБМ	24
Реорганизация ОКБМ	29
Об организации проектных работ над «заделом»	34
Методология работы по созданию реакторных установок	38
О кадровой политике	42
О значимости социального фактора	44
Основные результаты деятельности коллектива ОКБМ в области атомной энергетики	46
Малая атомная энергетика	62
Конверсия	72
Об отношении к атомной энергетике и доверии к науке	78
Перестройка и преодоление ее негативных последствий	83
Доклады, статьи, речи, выступления	103
Перспективы развития атомной энергетики	105
Атомная энергетика и ее роль в развитии общества	105
Перспективы развития ядерной энергетики России	111
Концепция и проектные решения реакторов нового поколения ...	118
Предложения в обеспечение перспективного развития атомной энергетики России в XXI столетии	124
Опыт ОКБМ в разработке высоконадежных узлов трибосопря- жений для циркуляторов атомной энергетики	129
Особенности принципиальной схемы и конструкции опытно-промышленного образца высокотемпературного газоохлаждаемого реактора	133
Высокотемпературный газоохлаждаемый реактор — экологически чистый и безопасный энергоисточник для комплексного энергообеспечения промышленных объектов ..	137
Судовые реакторные установки	143
Перспективы использования судовых реакторных установок	143
О перспективах развития судовых ЯЭУ	149
Перспективы использования ЯЭУ на коммерческих судах в условиях Севера России	159
Реакторы на быстрых нейтронах	170
Перспективы развития быстрых реакторов-размножителей ...	170
Заключение научно-технической экспертизы проекта БРЕСТ-ОД-300	185
Опыт эксплуатации и проектирования быстрых реакторов в СССР	198
Состояние и перспективы разработки в СССР радиационно- стойких конструкционных материалов для активной зоны быстрых реакторов	212
Быстрые реакторы: опыт разработки, создания и эксплуатации, перспективы развития	218
Малая атомная энергетика. Атомное теплоснабжение	227
О перспективе развития малой атомной энергетики в России ...	227

К вопросу о перспективе развития малой атомной энергетики (МАЭ)	229
К вопросу об экономической эффективности АЭС малой мощности	233
Некоторые вопросы технико-экономической оптимизации атомной энергетики	236
Реакторные установки малой мощности типа АБВ	239
Атомные станции теплоснабжения – новый этап в развитии атомных станций в СССР	248
Вопросы контроля ресурсной надежности энергетических реакторов	255
К вопросу о создании эксплуатационного мониторинга ресурса оборудования и систем ядерных энергетических установок ...	255
Проблемы обеспечения надежности, ресурса и безопасности ядерных энергетических установок	266
Соображения, навеянные перестройкой	274
Тезисы выступления на Всероссийском совещании 03.09.1999 ...	286
Тезисы выступления на конференции в Нижегородском государственном университете им. Н.И.Лобачевского 28.09.1999	290
Тезисы выступления на открытии конференции по теории оболочек и пластин, 17.09.2002	292
Тезисы выступления на открытии семинара по теме «Сборка» (г. Брянск, 02.10.2001)	294
Насущные проблемы сборочных технологий в отечественном производстве	295
О роли атомной энергетики в обществе	298
О необходимости согласования темпов развития науки, технологии и нравственного совершенствования общества	303
Перечень избранных публикаций Ф.М. Митенкова	308
Воспоминания коллег	317
Выдающийся Ученый и Гражданин	319
<i>Ф.Г. Решетников</i>	
О главном конструкторе реакторов БН	327
<i>М.Ф. Троянов</i>	
Ф.М. Митенков и ОКБМ	332
<i>Б.П. Папковский</i>	
Выдающийся конструктор и ученый	342
<i>Н.С. Хлопкин</i>	
Немного о Федоре Михайловиче Митенкове и быстрых реакторах ..	348
<i>Л.А. Кочетков</i>	
Генеральный конструктор. Директор. Профессор. Академик	353
<i>В.К. Коваленко</i>	
ОКБМ и быстрые реакторы: сквозь годы и поколения	369
<i>А.А. Ринейский</i>	
Ф.М. Митенков – коллега и соратник	378
<i>Г.А. Гладков</i>	
Наставник и Учитель	381
<i>Г.Б. Усынин</i>	
Ф.М. Митенков и Нижегородский политехнический университет ..	384
<i>А.В. Безносков</i>	
Из воспоминаний о совместной работе с Ф.М. Митенковым	386
<i>Я.Д. Арефьев</i>	
Наука убеждать	396
<i>Л.Б. Никитин</i>	

Ф.М. Митенков

*Размышления
о пережитом*

Компьютерная вёрстка: Б. Оводов

Подписано в печать 23.09.2004г. Формат 60х90/16
Бумага офсетная. Усл. печ. л. 25. Тираж 1000 экз.
Заказ № 10829

Издательство по Атомной науке и технике ИздАТ
123182, Москва, ул. Живописная, д. 46: тел. 190 9270

Отпечатано в ППП «Типография «Наука» РАН»
121099, Москва, Г-49, Шубинский пер. 6