



НИКОЛАЙ
СВЯТОСЛАВОВИЧ
ХЛОПКИН

60

Сборник подготовили:

А.Ю. Гагаринский, В.И. Ободзинский,
Б.Г. Пологих (ответственный за выпуск),
В.К. Попов, А.Н. Цибин

НИКОЛАЙ СИДОРОВИЧ

ХЛОПКИН

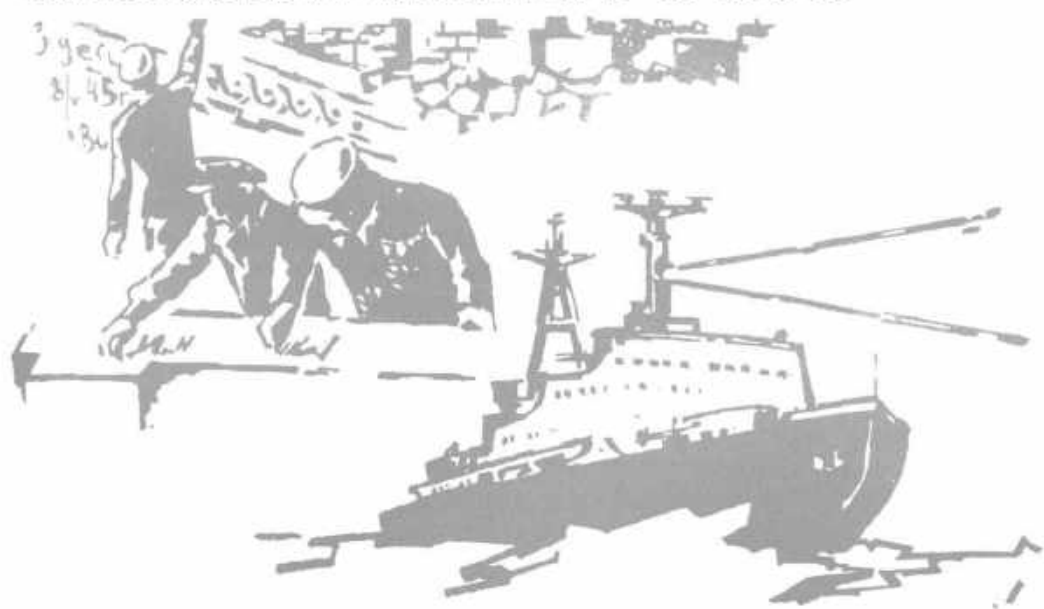
*к 60 летию
со дня рождения*



**9 АВГУСТА 1983 ГОДА ИСПОЛНИЛОСЬ 60 ЛЕТ
ЧЛЕНУ-КОРРЕСПОНДЕНТУ АН СССР
ГЕРОЮ СОЦИАЛИСТИЧЕСКОГО ТРУДА
НИКОЛАЮ СИДОРОВИЧУ ХЛОПКИНУ.
ПРЕДЛАГАЕМЫЙ СБОРНИК СОДЕРЖИТ
БИОГРАФИЧЕСКИЙ ОЧЕРК,
А ТАКЖЕ ИЗБРАННЫЕ ДОКЛАДЫ,
ОТРАЖАЮЩИЕ ЭТАПЫ РАЗВИТИЯ
ЯДЕРНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК
ЛЕДОКОЛОВ.**



ЧЛЕН-КОРРЕСПОНДЕНТ АН СССР
Н.С. ХЛОПКИН
БИОГРАФИЧЕСКИЙ ОЧЕРК



К ЗНАНИЯМ СКВОЗЬ ВОЙНУ

Николай Сидорович Хлопкин родился 9 августа 1923 г. в крестьянской семье в деревне Ильинки вблизи г. Петушки Владимирской области. В формировании его характера сказалась обстоятельность сельского уклада жизни. Все делалось продуманно, ладно, надежно.

Отрочество Хлопкина совпало с годами бурной индустриализации нашей страны, массовыми трудовыми подвигами и героическими событиями. Коля Хлопкин учился успешно и к семнадцати годам закончил среднюю школу.

Летом 1940 г. он поступил на теплоэнергетический факультет Московского энергетического института. Студенческие дни летели быстро. Вскоре позади был уже первый курс и настало роковое воскресенье – 22 июня 1941 г. с внезапной вестью о войне. Всё охватил мощный священный призыв "Вставай страна огромная, вставай на смертный бой!" и всё пришло в движение. Шли поезда на запад, шли поезда на восток. На колесах люди, станки, военная техника. Студент Хлопкин также в поездах: сначала с институтом на восток в далекий Лениногорск, затем на запад на Днепровские укрепления и вскоре в Тамбовское пехотное училище.

В августе 1942 г. по окончании училища лейтенант Хлопкин был направлен на Воронежский фронт. Здесь в это же время сражался и погиб его отец. В жестоких боях быстро таяли ряды бойцов. 30 сентября был тяжело ранен в ногу и Николай Сидорович. Четырнадцать трудных долгих месяцев он провел в госпиталях, перенес несколько операций и, наконец, поднялся и вернулся в строй. В январе 1944 г. Хлопкин вновь на фронте в должности помощника начальника штаба полка.

Советские войска наступали. Победу за победой одерживал полк, в котором сражался Хлопкин. Однажды, оценив обстановку при быстро изменяющейся линии фронта, Николай Сидорович дал сигнал немецкому летчику на посадку в районе расположения наших войск. Самолет с летчиком был захвачен нашими бойцами. Находчивость Хлопкина была отмечена орденом Красной Звезды.

В 1944 г. Николай Сидорович стал кандидатом в члены КПСС.

В 1945 г. Хлопкин сражается на Берлинском направлении. В майские дни он участвует в операциях по ликвидации очагов сопротивления фашистов под Берлином. Пришлось ему побывать и на развалинах рейхстага, где он оставил свою подпись. Боевые заслуги капитана Хлопкина были отмечены в 1945 г. еще одним

орденом Красной Звезды, орденом Отечественной войны II степени и боевыми медалями.

Уже в первые дни после победы Николай Сидорович почувствовал усиление болей в раненой ноге. Нужно было госпитализироваться, но Николай Сидорович не хотел оставаться в Германии и вместе со своим полком передислоцировался на территорию Западной Украины. Однако здесь стал быстро развиваться воспалительный процесс, и Хлопкина срочно направили на лечение в Москву. В августе 1945 г. он был помещен в госпиталь на Госпитальной площади, которая совсем рядом с Лефортово и Московским энергетическим институтом. Очень хотелось вернуться к учебе, не пропустить приближающийся учебный год, но болезнь удерживала в постели.

Лишь в октябре состояние здоровья Николая Сидоровича начало улучшаться, стали под силу длительные прогулки. Он сразу же отправился на Красноказарменную улицу в родной институт. В деканате теплоэнергетического факультета встретили тепло, вспомнили студента Хлопкина, но не нашли его зачетную книжку и зачислили повторно на первый курс, хотя и разрешили заниматься по программе второго курса.

Вольноопределившийся в студентах Хлопкин вернулся в госпиталь и здесь выхлопотал для себя режим лечения, согласующийся с учебой в институте. Вскоре стало ясно, что на какие-либо успехи можно надеяться, если сократить путь до института, приблизиться к его аудиториям, лабораториям и библиотеке. В ноябре Хлопкин выписался из госпиталя и переселился в студенческое общежитие.

Зимнюю сессию второго курса Николай Сидорович сдал на пятерки и был зачислен на второй курс. В дальнейшем он учился также на отлично.

В 1947 г. лучшим студентам предложили продолжать учебу на новом физико-энергетическом факультете с расширенной учебной программой, с новыми интересными науками и с увеличенной продолжительностью учебы. Заманчивая перспектива привлекала — ведь речь шла о замене угольной топки котла ядерным реактором. И Хлопкин стал студентом нового факультета. Здесь читался обширный курс нейтронной физики. Его прекрасно преподносил профессор С.М. Фейнберг. Решением новых задач по нестационарной теплопроводности увлекал А.В. Лыков. Большая роль отводилась самостоятельной работе с книгами. Курсовую и преддипломную практику студенты проходили в научно-исследовательских институтах. Там же они выполняли дипломные проекты.

Николай Сидорович был направлен в Лабораторию измерительных приборов АН СССР, руководимую академиком И.В. Курчатовым. Еще студентом-практикантом он был принят сюда на работу в качестве лаборанта.

Дипломные проекты студентов были посвящены разработке ядерных паро-производящих установок для электростанций. Июньский день 1950 г. — день защиты дипломных проектов — был напряженным. Совсем новые темы, а председатель комиссии — сам Анатолий Петрович Александров.

Защита прошла хорошо, проекты получили полное одобрение. Николай Сидорович Хлопкин стал инженером-физиком. Начатая в 1940 г. учеба в институте закончилась. Пройден путь в науку длительностью 10 лет сквозь "бои мирового значения".

Инженер Н.С. Хлопкин был оставлен работать в ЛИП АН СССР. Ему поручили отработку методики контроля сцепления топливных сердечников с их оболочками. О качестве сцепления судили по совершенству теплового контакта. Выявление чувствительности контроля требовало решения задачи нестационарной теплопроводности в двумерной геометрии. Хлопкин решил эту задачу и успешно закончил исследование. Результаты стали основой будущей диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. Путь к защите длился около пяти лет, он осложнялся отвлечением на иные задачи и переходом к новой необычайно интересной теме.

В нашей стране было принято решение о строительстве мощного атомного ледокола для Арктики. Научным руководителем по созданию ледокола был назначен академик А.П. Александров, научным руководителем по физике ядерных реакторов — академик И.В. Курчатов. В ЛИП АН СССР предстояло выполнить нейтронно-физические расчеты активных зон ядерных реакторов, обосновать выбор этих зон, подтвердить их расчетные характеристики экспериментальными исследованиями. Следовало предопределить решение всех вопросов ядерной и радиационной безопасности, обеспечить руководство разработкой компоновки реакторов, оборудования, трубопроводов первичного теплоносителя и рассчитать и частично экспериментально подтвердить толщины защитных барьеров от нейтронного и гамма-излучений.

Хлопкин возглавил группу специалистов, на которую возлагалась вся сложная практическая деятельность обеспечения научного руководства со стороны ЛИП АН СССР по созданию ледокола и его атомной паропроизводящей установки. Группа комплектовалась с осени 1953 г., ее пополняли молодые инженеры-физики.

Вариантные проработки показали, что заданные тактико-технические характеристики ледокола (ледопроездимость, маневренность во льдах) можно обеспечить, лишь размещая на нем малогабаритные реакторы с водой под давлением корпусного типа. Необходимые малые размеры и относительно небольшую массу обеспечивала защита, в основе которой был бак с водой и стальными металлоконструкциями. Физиков беспокоила надежность работы сложных конструкций при качке ледокола и при ударах льда о его борта во время движения во льдах. Опасность последнего они представляли лишь по рассказам, и поэтому обсуждали план выезда в Арктику на ледоколы, читали записки Папанина и толковали о шубах, унтах, меховых шапках. Однако поездка откладывалась, так как разработка проекта ледокола проходила весьма активно и требовала непрерывного участия в ней.

Корабелы, озадаченные необычно большой для судов сосредоточенной нагрузкой от всей массы атомной установки, выводили у физиков "запасы" в защите от излучений. Не искушенные в вопросах физики защиты, они толковали о тканях для костюмов экипажа, которые дескать способны уберечь людей от нейтронов и гамма-квантов и поэтому позволят уменьшить толщины стальных защитных экранов.

Вникая в разные вопросы, совершая много командировочных поездок, Николай Сидорович Хлопкин переутомился. Опять разболелась нога, и потребовалось новое серьезное лечение. В 1956 г. Хлопкин перенес тринадцатую операцию. Она была удачной. Больному был предписан подвижный образ жизни, что весьма подходило его характеру, и он вскоре окончательно победил коварное наследие войны. Любитель леса, его даров, Хлопкин все больше и больше стал увлекаться самостоятельным туризмом, заразился фотографией и включился в воскресные лыжные вылазки в Подмоскowie.

24 августа 1956 г. первая корпусная конструкция ледокола "Ленин" была опущена на стапель Адмиралтейского завода и строительство ледокола в Ленинграде приняло осязаемую конкретность. Физики оказались вовлеченными в многочисленные согласования возможностей технологии сборки отсеков и конструктивов защиты с требованиями, заложенными в чертежах и инструкциях и продиктованными надежностью и безопасностью. Атомщики теперь впитывали опыт корабелов и специалистов машиностроения. Заместитель научного руководителя Хлопкин решал массу оперативных вопросов с главным конструктором ледокола В.И. Негановым, с создателями энергетической установки И.И. Африкантовым, Е.Н. Черномордиком, с ведущими конструкторами Б.Я. Гнесиным, А.Н. Василевским и др. и с главным строителем ледокола В.И. Червяковым. У всех Николай Сидорович пользовался большим авторитетом. Без него не принималось ни одно решение, так или иначе касающееся надежности и безопасности энергетической установки ледокола.

Совсем незаметно наступило время спуска ледокола на воду — 5 декабря 1957 г. Был ненастный день, шел мокрый снег. Но около стапеля с громадой корпуса ледокола было многолюдно и празднично. Прорезая завесу липкого снега, трепетали флаги расцветивания. Речи на трибуне сменила громкая команда "Отдать курки!", и вслед за ней началось медленное, но более ничем не удерживаемое движение огромной массы корабля. Она вдруг покатилась и хлестко врезалась в Неву, огрызнувшуюся взметнувшейся пеной.

Первое в мире атомное надводное судно закачалось на воде!

В 1958 г. деятельность десятков совнархозов была нацелена на достройку атомохода у "стенки завода". Напряженный и узкий фронт работ проходил по опутанным кабелем и воздуховодами отсекам и действовал круглосуточно. Ледокол искрился бесконечными вспышками сварки. Здесь было жарко всем, конечно, и физикам. Домой в Москву они ездили теперь как в гости.

Осенью 1958 г. в Женеве состоялась Вторая Международная конференция по использованию атомной энергии в мирных целях. В составе советской делегации на конференцию выехал Н.С. Хлопкин. Здесь он более детально знакомился с особенностями развития атомной энергетики, замыслами создания американского атомохода "Саванна". Конференции был представлен наш доклад об энергетической установке ледокола.

Строительство атомного ледокола явилось своеобразным соревнованием с созданием грузо-пассажирского атомохода "Саванна". Специалисты из США посетили Адмиралтейский завод и побывали на ледоколе во время монтажа реакторов и оборудования контура первичного теплоносителя. В составе группы

специалистов был "отец" атомного подводного флота США адмирал Риквер. Гости поняли, что "Саванна" проигрывает соревнование.

Наступил решающий 1959 г. — год швартовых и ходовых испытаний атомного ледокола. Предстояло почти в центре многомиллионного города вывести на мощность ядерные реакторы. Следовало организовать четкое выполнение этой потенциально опасной операции и убедить в допустимости ее проведения. За это отвечали Н.С. Хлопкин и физики-экспериментаторы из ЛИП АН СССР. Они взяли на себя ответственность за загрузку ядерным топливом и физический пуск реакторов, проверку их нейтронно-физических характеристик и вывод всей энергетической установки на мощность. За организацией радиационной безопасности и контролем радиационной обстановки в районе ледокола вели надзор специалисты Министерства здравоохранения под руководством А.И. Бурназяна.

В слаженной работе с экипажем ледокола, сдаточной командой завода и испытательной группой весь комплекс работ от пуска реакторов до выдачи соосвоенного "атомного пара" был выполнен примерно за три месяца. Корреспонденты газет уважительно писали о "шуме нейтронов в реакторах", а прежняя информация о прокладке бесконечно большого числа длинных трубопроводов и кабелей ушла в архивы.

В воскресенье 14 сентября 1959 г. ледокол "Ленин" был выведен на Неву к мосту лейтенанта Шмидта. Он попрощался с Ленинградом и был неотразимо красив. Им любовались с набережных Невы тысячи ленинградцев, Хлопкин, создатели ледокола. Следующим утром ледокол подхватили четыре маленьких хлопотливых буксира и, обдавая его свежевыкрашенные борта нефтяным перегаром, потащили к морскому каналу мимо торгового порта на встречу с морем. На пути следования необычного каравана все, что могло, гудело, желая счастливого плавания. Тифон ледокола зычно благодарил.

После дополнительных приготовлений на рейде за портом 17 сентября ледокол продолжил движение. Его вел морской буксир "Профессор Попов". Ледокол был готов к самостоятельному плаванию и слегка подрабатывал винтами на малых оборотах.

У Старого карантина за Кронштадтом "Профессор Попов" замедлил движение. Ледокол, ослабив буксирный трос, стал опасно сближаться с буксиром. Тогда капитан ледокола Павел Акимович Пономарев изменил курс, приказал отдать буксирный трос и увеличить число оборотов винтов.

Поздравительные слова капитана слились во всех динамиках ледокола с длинным низким гудком радости освобождения, самостоятельного движения корабля. Находившийся на борту ледокола Анатолий Петрович Александров поблагодарил всех участников создания ледокола за самоотверженный труд, завершившийся замечательным успехом; он выразил благодарность Хлопкину, взявшему на себя всю полноту обязанностей научного руководителя на наиболее важном, последнем этапе работ, когда почти все делалось впервые.

Два с половиной месяца ледокол пробовал свои силы, работая "на упор" возле местечка Манола, и бороздил Финский залив, работая поочередно левым, правым, средним винтом и всеми вместе. К 3 декабря 1959 г. с этим всем было

покончено и на ледоколе "Ленин" был подписан акт о передаче его в опытную эксплуатацию Мурманскому морскому пароходству.

В канун Первой 1960 г. ледокол отправился из Балтики в Мурманск. В этом первом длительном рейсе принял участие Хлопкин. Он внимательно следил за работой реакторов и оборудования, особенно во время сильной качки на мертвой зыби в Северном море, спускался в машинные отделения, взлетал по трапам на верхние палубы и фотографировал нахальный натовский самолет, усердно облетающий ледокол, и сторожевой корабль береговой охраны, следовавший за ледоколом в датских водах. Наблюдатели контролировали, не загрязняет ли ледокол воздух и воду радиоактивными веществами. Но загрязнений не было. Сторожевой корабль на выходе в Северное море круто развернулся перед ледоколом и, уходя назад, выбросил флаги с пожеланием доброго пути.

6 мая свинцовые воды Баренцева моря прорезали снеговые шапки сопки. Показался полуостров Кильдинг — угрюмый часовой перед Кольским заливом. Ледокол взял курс в залив, сбавил ход и пошел длинными милями в Мурманск.

Хлопкин знакомился с суровым Заполярьем. Позади у него было десять творческих лет, десять лет после защиты дипломного проекта с ядерным реактором для электростанции. Теперь в работе реакторы атомного ледокола. Все свершенное вполне достойно высокого звания лауреата Ленинской премии. Это звание было присуждено Николаю Сидоровичу в 1960 г.

ПРОВЕРКА ЛЬДАМИ

Первое посещение Мурманска Хлопкиным было весьма коротким. Он спешил в Москву и далее в Лондон, где с 17 мая по 17 июня 1960 г. проходила конференция по охране человеческой жизни на море. В ее работе приняла участие делегация СССР, в составе которой был Николай Сидорович. В новый текст "Международной конвенции по охране человеческой жизни на море" было включено "Приложение С" с рекомендациями для ядерных судов. В выработке его было важно учесть тот опыт разработки и эксплуатации надводного гражданского ядерного судна, которым располагал Советский Союз.

Вернувшись из Лондона, Хлопкин уже в 1960 г. побывал на ледоколе "Ленин" во льдах Арктики, но, пожалуй, более серьезное знакомство со льдами у него состоялось в 1961 г.

29 сентября 1961 г. ледокол "Ленин" вышел из Мурманска с персоналом и грузом полярной дрейфующей станции "Северный полюс-10". На борту ледокола был также Николай Сидорович Хлопкин. Атомоходу было поручено доставить коллектив зимовщиков непосредственно на льдину. Высадка полярников с судна предпринималась впервые. После выполнения этой задачи ледокол должен был расставить вдоль кромки многолетних льдов дрейфующие автоматические радиометеостанции (ДРАМС).

Поход стал серьезным испытанием ледокола. Движение во льдах сопровождается тряской и вибрацией всего, что может вибрировать. Вблизи корпуса

ледокола на уровне средней и жилой палуб стоит грохот ударов и скрежет льдин о стальные борта судна. Движение из непрерывного переходит в движение набегам — ударами в лед. Ледокол наползает носовой частью на лед и опускается, проламывая его. Все выглядит как килевая качка судна во льдах. Несмотря на такие условия, отказов в работе реакторов и обслуживающих систем, вызванных вибрацией, качкой и ударами, не было.

14 октября в Чукотском море в точке с координатами $75^{\circ}30'$ северной широты и $177^{\circ}07'$ восточной долготы была выбрана подходящая для полярников льдина и началась разгрузка, строительство сооружений СП-10 и аэродрома. Николай Сидорович вместе со всеми трудился на ледяном поле. К дню открытия XXII съезда КПСС — 17 октября — все строительные работы были закончены.

25 октября ледокол "Ленин" отправился расставлять ДРАМСы. В условиях полярной ночи он прошел выше Новосибирских островов, поднявшись на 80-ю параллель. Затем он спустился к проливу Вилькицкого и 16 ноября прошел через него на запад. Спустя шесть суток ледокол был в Мурманске.

В течение первых трех лет эксплуатации ядерных реакторов ледокола были получены фактические данные по изменению их нейтронно-физических характеристик в продолжение всей кампании (работы на одной топливной загрузке). Был приобретен опыт эксплуатации энергетической установки в целом. Определились пути совершенствования управления ядерными реакторами, обладающими замечательным свойством саморегулирования по мощности. Весной 1963 г. была осуществлена первая перезарядка реакторов ядерным топливом, также давшая немало важной технической информации. Все в целом явилось отправным материалом для формирования основных положений технического задания на создание более совершенной атомной паропроизводящей установки для судов ледового плавания.

Итоги первых трех лет эксплуатации атомной установки ледокола "Ленин" были изложены в докладе Н.С. Хлопкина на Третьей Международной конференции по использованию атомной энергии в мирных целях (Женева, 1964). То, что было проектным материалом в докладе предыдущей конференции, теперь стало фактическими данными, полученными в самых суровых условиях эксплуатации с "проверкой льдами".

Американская делегация не представила доклада по опыту эксплуатации атомохода "Саванна", но пригласила на атомоход специалистов советской делегации. В то время "Саванна" находилась в водах северного побережья Европы. Николай Сидорович Хлопкин побывал на "Саванне", имел интересные беседы с главным механиком, посетил пульт управления реактором и ряд служебных помещений с оборудованием атомной установки. Для американских инженеров было открытием осуществление на ледоколе "Ленин" очистки воды первого контура без сброса давления при непрерывной рециркуляции части общего расхода воды через ионообменный фильтр. Нашим специалистам представлялось неоправданно сложным постоянное поддержание газовой инертной атмосферы в помещении с приводами стержней регулирования во время работы реакторов. Оказалась интересной оптимизированная организация радиационного контроля на

"Саванне" с использованием предельно малого, но достаточно обоснованного набора приборов.

В познавательном плане была любопытной автобусная поездка из Женевы по южной Франции в Гренобль — один из центров французских исследований по ядерной и нейтронной физике, по ядерному материаловедению.

В 1966 г. ресурс опытной ядерной энергетической установки был исчерпан и намеченная программа изучения ее характеристик выполнена. Поэтому было принято решение о замене на ледоколе "Ленин" атомной паропроизводящей установки новой, более совершенной, проект которой был уже разработан.

Николай Сидорович Хлопкин всесторонне обобщил материалы по опыту создания атомного ледокола и итогам эксплуатации его ядерных реакторов и по этим материалам в 1968 г. защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук.

Накопленный опыт подсказывал важность дальнейшего углубленного исследования динамики ядерных реакторов на судах. Понимание протекания переходных процессов в нормальных режимах эксплуатации и во время аварийных ситуаций открывает путь к совершенствованию в использовании ядерного топлива. Поэтому Хлопкин организует и в шестидесятых годах возглавляет лабораторию нестационарных процессов. Под научно обоснованную программу изучения динамики ядерной энергетической установки в этой лаборатории была скомплектована специальная аппаратура, включающая, в частности, аналоговый реактиметр и магнитограф и позволяющая одновременно измерять десятки параметров с высокой статической и динамической точностью и использованием штатных и нештатных первичных измерительных устройств (датчиков). Такая аппаратура позволяла быстро и всесторонне проверять динамические характеристики новой энергетической установки во время проведения ее испытаний. Она была применена в период швартовых и ходовых испытаний ледокола "Ленин" с новыми реакторами.

Пуск новых реакторов ледокола "Ленин" проводился в конце апреля 1970 г. под руководством Хлопкина. В середине мая швартовые испытания были завершены. В течение последней декады мая ледокол прошел всю программу ходовых испытаний и в июне приступил к работе на трассах Севморпути по проводке через льды судов с народнохозяйственными грузами. Новая атомная парогенерирующая установка ледокола оказалась также безотказной при качке, вибрации и ударах ледокола о льды.

АТОМНОЕ СУДОСТРОЕНИЕ НА ЭТАПЕ ЗРЕЛОСТИ

В составе новой атомной установки ледокола "Ленин" не три (как ранее), а только два ядерных реактора и совершенно исключены протяженные трубопроводы большого диаметра. Парогенераторы и насосы присоединены к реактору короткими патрубками. Все разъемные соединения оборудования расположены только в верхних частях, доступных для осмотра и вскрытия из одного помещения, приспособленного для таких операций. Усовершенствовано и упро-

щено управление реакторами за счет использования отрицательного температурного коэффициента реактивности активных зон. Уровень мощности реактора устанавливается автоматически в зависимости от расхода воды второго контура, направляемой в парогенераторы.

Новая усовершенствованная реакторная установка разрабатывалась с учетом перспективы применения ее на более мощных атомных ледоколах, чем ледокол "Ленин". Необходимость их в Арктике для обеспечения планомерной перевозки грузов с расширенной по срокам навигацией стала совершенно очевидной. Период автономного плавания ледокола предполагался около года, остановка его на перезарядку ядерным топливом должна осуществляться не чаще, чем один раз в 2 — 3 года.

Научной и технической задачей для Хлопкина, физиков и технологов было изыскание путей повышения энергозапаса активных зон ядерных реакторов по крайней мере в 2 раза по сравнению с тем, что было в первых активных зонах реакторов ледокола "Ленин". Для решения этой задачи был использован опыт эксплуатации активных зон различных типов в первых трех реакторах ледокола. Была усовершенствована методика нейтронно-физических расчетов при глубоком выгорании топлива, отработаны алгоритмы компенсации запаса реактивности активных зон и определены пути необходимого совершенствования водно-химического режима в первых контурах атомных установок.

В целом к семидесятым годам под научным руководством Хлопкина была создана атомная установка второго поколения и завершилось проектирование нового ледокола с этой установкой. Главным конструктором ледокола был А.Е. Перевозчиков.

3 июля 1971 г. на Балтийском заводе в Ленинграде состоялась закладка нового атомного ледокола "Арктика". Его мощность составляла 75 000 лошадиных сил вместо 44 000 у ледокола "Ленин". Ледокол создавался с учетом требований международной конвенции 1960 г. по безопасности плавания, с учетом рекомендаций по ядерным судам. Со стороны научного руководства было повышено внимание к обоснованию алгоритмов управления паропроизводящей установкой и анализу потенциально ядерно- и радиационно-опасных аварийных ситуаций с выработкой предложений по мерам их предотвращения.

26 декабря 1972 г. ледокол "Арктика" был спущен на воду. В 1973 г. параллельно с достройкой ледокола у "стенки завода" проводились стендовые испытания системы управления ядерными реакторами. Балтийский завод готовился к швартовным испытаниям.

9 августа 1973 г. Николаю Сидоровичу Хлопкину исполнилось 50 лет. Он встретил эту дату, имея двадцатилетний опыт работы в атомном судостроении. Министерство Морского флота СССР отметило заслуги юбиляра, присвоив ему звание "Почетный работник Морского флота".

Николай Сидорович, являясь учеником и помощником Анатолия Петровича Александрова, как и учитель, не ограничивается рассмотрением вопросов в рамках оговоренного круга. Он всегда вникает в смежные решения, влияющие на главные и в конечном счете на безопасность судна в целом. Это обязывает его постоянно расширять свой научный и технический кругозор, экономить время и

быть предельно собранным. Его рабочий день начинается не позднее 8.00, а заканчивается, как правило, около 19.00. По дороге домой Николай Сидорович заглядывает в библиотеку и знакомится с новинками технической литературы.

Наряду с научной деятельностью коммунист Хлопкин постоянно занимается активной общественной работой. Он неоднократно избирался членом парткома Института, был членом Краснопресненского РК КПСС г. Москвы.

Несмотря на большую занятость, Хлопкин в семидесятых годах работает над учебником "Судовые ядерные энергетические установки".

Не забывает Николай Сидорович родные Ильинки. Здесь в окрестных лесах у него есть заветные ягодные и грибные места. Уже ранней весной он умудряется выбрать время и собрать первые грибы — сморчки да строчки. На грибы приходят гости и заводят речь о летних байдарочных походах. У Хлопкиных это любимый вид отдыха. К туризму приобщена вся семья, а в ней трое детей.

На байдарках бывали в Приуралье на реке Белой, проходили песчаными перекатами в верховье реки Великой на Псковщине, но Хлопкина все больше и больше привлекают озера Карелии.

Как-то зимой соблазнили Николая Сидоровича на Кавказ, и он освоил горные лыжи, нередко повторяя зимний отдых в горах.

Летний отдых у Хлопкина обычно завершается творческой работой над "кино-фотодокументами". Умелая режиссура их с использованием скрытых съемок дает завлекательный рассказ об интересном походе. Тут обнаруживаются и незаурядные способности Хлопкина-рыболова, и прочие его качества, определенные уважительным походным званием "адмирал".

Середина семидесятых годов явилась периодом анализа возможностей атомных коммерческих судов, оценки их конкурентоспособности судам на органическом топливе. Экономической перспективности применения ядерной энергии на судах способствовало быстрое возрастание цен на нефть.

В Отделении ядерных реакторов ИАЭ им. И.В. Курчатова под руководством Н.С. Хлопкина проводились работы по изысканию путей повышения эффективности использования ядерного топлива на судах. С учетом опыта эксплуатации ледокола "Ленин" разрабатывались основы комплексной автоматизации энергетической установки, позволяющей сократить обслуживающий персонал и одновременно улучшить характеристики установки, особенно в переходных и аварийных режимах. Работы в этом направлении велись совместно с коллективами сотрудников Ф.М. Митенкова и ряда других предприятий. Уже на ледоколе "Арктика" было предусмотрено наряду с дистанционным автоматическое совместное управление паропроизводящей установкой и всеми потребляющими пар механизмами. При таком управлении выработка пара на судне соответствовала на каждый момент времени необходимой потребности в нем. Избытки пара при этом отсутствуют. На ледоколе "Арктика" был осуществлен централизованный контроль за теплотехническими параметрами. Для этого использована ЭВМ. Машина вырабатывает логику засветки мнемосхемы, что позволяет оператору контролировать работу оборудования и прохождение команд.

В 1974 г. пришло время проверки задуманного в действии. Осенью во время швартовных испытаний "Арктики" на мощности у "стенки завода" вновь был

применен разработанный в ИАЭ им. И.В. Курчатова многоканальный магнитограф. Он позволял многократно воспроизводить полученные данные сразу же после испытаний и в требуемом масштабе времени. Фактические данные было легко сопоставлять с расчетными. Швартовые и ходовые испытания прошли быстро и успешно.

Атомное судостроение сформировалось как самостоятельное научное и техническое направление. Заслуги Николая Сидоровича Хлопкина получили общее признание, и 23 августа 1976 г. он был избран членом-корреспондентом АН СССР.

В СВОБОДНОМ ПЛАВАНИИ К ПОЛЮСУ

В Арктике шло непрерывное освоение новых трасс перевозки грузов и расширение сроков их доставки. Еще в 1970 г. с участием ледокола "Ленин" было положено начало плаванию судов на трассе Мурманск — Дудинка — Мурманск с охватом позднего осеннего периода по декабрь. Пользуясь благоприятными условиями приемки грузов на припайный лед ранней весной, с 1976 г. атомные ледоколы осуществляют ежегодную проводку судов с грузами для газодобытчиков полуострова Ямал. Такие операции стали проводиться в необычно ранний период: в феврале — марте каждого года.

В 1976 г. ледокол "Ленин" подтвердил большую автономность плавания, на которую были ориентированы атомоходы. Он находился в непрерывном плавании 11 месяцев.

Весь комплекс событий в Арктике предопределял дальнейшие шаги в ледовой эпопее, разведку прочности льдов в высоких широтах и поиск оптимальных маршрутов судоходства из западного сектора Арктики в восточный. Атомоход "Арктика" начал подготовку к такой разведке. Перед ним была поставлена задача достичь в свободном плавании Северного полюса. В начале августа 1977 г. он был подготовлен к такому плаванию. В подготовке участвовал и Николай Сидорович Хлопкин, он был включен также в состав экспедиции. Ледокол "Арктика" снялся с якоря 9 августа в 20.00.

Из Баренцева моря курс был взят на восток в Карское море. Здесь вечером 12 августа произошла встреча с ветераном — атомоходом "Ленин". По его свежей ледовой дорожке "Арктика" пошла в пролив Вилькицкого, а там за Северной Землей на 129° восточной долготы взяла курс на полюс.

С 14 августа началась трудная работа. Ледокол преодолевал сплошные многолетние льды толщиной 2 — 3 метра, боролся со сжатием, прибегал местами к тактике движения ударами. Экипаж трудился с вдохновением и верил в свой корабль. Капитан Юрий Сергеевич Кучиев в те дни сказал: "Нет силы, чтобы повернуть нас обратно..."

Наконец исторический день — 17 августа, среда. Судовой журнал гласит:

"01.00. Остановились для определения места ледокола...

01.24. Продолжаем движение...

02.00. Остановились. Лед 2 — 3-летний, паковый, толщина 250 — 350 см. Местами на стыках полей свежее горошение до 4 — 6 м. Видимость ухудшилась до 3 кабельтовых. Туман. В воздухе барражирует вертолет...

04.00. Согласно обсервации по радионавигационной системе ледокол вышел на географический Северный полюс”.

Итак, напряженный путь от Мурманска до полюса пройден за несколько дней. Атомная энергетическая установка ледокола не подвела. Николай Сидорович остался доволен подопечными реакторами. По возвращении в Мурманск, когда позади был весь 13-суточный поход длиной в 3850 миль с 1200 милями в многолетних сплошных ледовых полях, он сказал: ”Мы использовали плавание ”Арктики” для наблюдения за работой ядерного сердца корабля — его атомной паропроизводящей установки. Надо сказать, что столь значительных и долгих механических нагрузок — вибрации, тряски, резких ударов, как в этом рейсе, реакторам наших атомоходов еще не приходилось испытывать. Длительного использования их полной мощности также никогда прежде не требовалось. Выдержали они ледовый экзамен на ”отлично”: в самых тяжелых условиях работали в строго заданных параметрах”.

Полюс все ждали с напряжением, последнюю ночь не спали. Пришли, определились. Как вспоминает капитан Юрий Сергеевич, он сначала даже растерялся. Потом мостик охватило непривычное праздничное волнение.

В 09.40 собрались на подъем Государственного Флага СССР. Люди сомкнулись в круг, нацелясь глазами на медленно всплывающий флаг: вверх как по земной оси. Тишину прорезал один за другим двадцать один винтовочный залп. Затем Юрий Сергеевич Кучиев вынес с ледокола и прислонил к флагштоку уникальную реликвию — древко флага Георгия Седова. Наконец-то оно достигло Северного полюса.

Сразу после торжественной части все ринулись в ”кругосветное путешествие”, скорость которого превзошла космическую — шли-то вокруг полюса по кругу диаметром всего 100 метров. Активно работали фотографы. Были тут и цветы, и арбуз, и ИЛ-14 над головой. С самолета известный полярник М.И. Шевелев советовал капитану по радиотелефону: ”Перед уходом смажьте земную ось”.

Уходили в 17.30, приравняв полюс от растерянных вещей и арбузных корок. Ледокол пошел новым курсом прямо на Мурманск. Первые сутки его движение было особенно трудным, но затем все легче и легче, а в воскресенье 21 августа в 10.00 ”Арктика” вышла на чистую воду. Путь во льдах от полюса занял около 3,5 суток.

23 августа ледокол ”Арктика” входил в мурманский порт, его встречали тысячи людей. На митинге участник похода на полюс министр Морского флота Т.Б. Гуженко сказал: ”Высокоширотный рейс ”Арктики” — начало качественно нового этапа в развитии советского морского флота. Поход мощного атомохода был задуман и осуществлен как генеральная проба сил перед новым наступлением на арктические льды.

...Результаты проведенного эксперимента будут изучены и использованы как основа для пересмотра технической политики в области морского транспортного судостроения и традиционных схем грузоперевозок. Это касается, в частности, создания еще более мощных ледоколов, крупнотоннажных лихтеровозов, контейнерных судов ледокольного класса на ядерном топливе, проводки их по более

коротким рациональным транспортным магистралям. Необходимость таких решений диктуется долгосрочными задачами, выдвинутыми Коммунистической партией для экономического освоения и развития новых регионов Заполярья, Сибири, Дальнего Востока".

За выдающиеся заслуги в подготовке и осуществлении экспериментального рейса атомного ледокола "Арктика" в район Северного полюса и проявленные при этом мужество и героизм Николаю Сидоровичу Хлопкину было присвоено звание Героя Социалистического Труда. Этому званию были удостоены еще четыре участника похода: старший мастер атомной установки Ф.Ф. Асхадуллин, министр Морского флота Т.Б. Гуженко, капитан "Арктики" Ю.С. Кучиев и главный инженер-механик ледокола О.Г. Пашнин.

НОВЫЕ ГОРИЗОНТЫ

После необыкновенных событий, впечатлений, связанных с ледовой эпопеей, конечно, требовался отдых, и Хлопкин отправился к морю, в Судак. Это был первый организованный путевкой летний отдых, да еще на юге. Стихия Нептуна здесь его волновала мало, он предпочитал походы в сторону гор к Генуэзской крепости.

Впереди новые задачи, более совершенные горизонты атомного судостроения. Осенью 1977 г. завершилось строительство и развернулись в полном объеме испытания второго атомного ледокола типа "Арктика". 5 января 1974 г. на атомоходе уже подняли Государственный Флаг СССР, "прописав" этим новое судно в список действующих. 29 января 1978 г. ледокол прибыл на рейд Мурманска, а 17 февраля он с дизель-электроходом "Наварин" отправился в обычный зимне-весенний рейс к мысу Харасавэй полуострова Ямал. Ледокол "Сибирь" оставлял свой первый автограф в прочных весенних льдах. Вот так просто, скупое по срокам входил в жизнь атомоход на 75 000 лошадиных сил в конце семидесятых годов.

Достижения атомных ледоколов, их высокая надежность при большой автономности плавания укрепили веру в них моряков, а атомные энергетические установки для судов арктического плавания стали рассматриваться Министерством Морского флота СССР как достаточно обоснованная альтернатива дизель-электрическим установкам. Расширились деловые контакты с министерством у ИАЭ им. И.В. Курчатова и непосредственно у Николая Сидоровича Хлопкина.

Освоение атомными ледоколами арктических трасс подсказывало новые решения по организации доставки народнохозяйственных грузов в северные районы нашей страны. Об этом, в частности, писал в газете "Правда" 29 ноября 1977 г. секретарь Якутского обкома КПСС товарищ Маркин. Он обращал внимание на то, что у Северного Ледовитого океана быстро набирают силу предприятия цветной металлургии, что в ближайшие 3 — 4 года в арктические районы Якутии потребуется доставлять грузов до 500 — 600 тысяч тонн. Доставка их с юга по рекам становится весьма проблематичной из-за больших грузопотоков и сопровождается омертвлением ценностей, так как задерживается

в пути иногда до двух лет. Поскольку "многометровые льды студеного океана уже не являются непреодолимым препятствием для продления навигации", автор статьи справедливо предлагает доставлять грузы на север Якутии морем.

С задумками о подобных и еще более отдаленных перспективных преобразованиях в транспортной системе Крайнего Севера был выполнен в 1978 г. весенний рейс атомохода "Сибирь" с транспортным судном. Это был рейс, подобный совершенному ледоколом "Ленин" с дизель-электрическим ледоколом "Владивосток" с 26 мая по 22 июня 1971 г. Если тогда шли вместе два ледокола, то теперь вторым был не ледокол, а ведомое им транспортное судно — дизель-электроход "Капитан Мышевский".

Из Мурманска суда вышли 25 мая и взяли курс на северо-восток к 80-й параллели. Там, возле семидесятого меридиана они пошли еще выше за островами Северной Земли в Восточно-Сибирское, а затем в Чукотское море. На семнадцатые сутки сложный ледовый поход был закончен с выходом на воду у острова Сердце-Камень вблизи Берингова пролива. Транспортное судно "Капитан Мышевский" получило лишь незначительные повреждения. Они были устранены, и судно с грузами продолжило путь в Берингов пролив самостоятельно.

Приближался юбилейный день ледокола "Ленин" — 20 лет со дня передачи его в опытную эксплуатацию. Ледокол в течение всего 1979 г. активно работал в западном секторе Арктики. Его плавание затянулось на рекордно длительный срок — 390 суток! Этим был взят рубеж круглогодичного плавания, и в Заполярье утратило смысл понятие "навигация".

20-летие ледокола "Ленин" было торжественно отпраздновано в декабрьские дни 1979 г. в Мурманске. Здесь состоялась научно-практическая конференция, на которой были подведены итоги работы всех систем и оборудования ледокола.

Ценный опытный материал по эксплуатации трех атомных ледоколов послужил основой для отработки глав кодекса по безопасности ядерных торговых судов, который создавался в 1979 — 1981 гг. на международных началах с участием специалистов СССР. В 1982 г. была закончена отработка "Правил классификации и постройки атомных судов", созданных под эгидой Регистра СССР. Наконец, по инициативе Государственной инспекции СССР по ядерной безопасности в 1981 г. были выпущены "Правила ядерной безопасности судовых атомных энергетических установок". Николай Сидорович Хлопкин был идеологом и непосредственным участником создания этого комплекса документов, базового для постройки и безопасной эксплуатации атомных судов. Под его руководством продолжается освоение новых горизонтов ядерной науки и техники применительно к атомному судостроению.

Министерством Морского флота СССР было признано целесообразным создание атомного лихтеровоза с повышенной самостоятельной ледовой проходимостью. Лишь на отдельных, наиболее тяжелых участках ледового пути такой лихтеровоз будет нуждаться в помощи ледоколов.

Лихтеровоз был спроектирован ленинградскими кораблями, а в качестве источника энергии на нем установлена атомная паропроизводящая установка с одним ядерным реактором. Решения по атомной установке базируются на таковых для атомных ледоколов и являются в достаточной мере проверенными. К строительству лихтеровоза приступил Керченский судостроительный завод.

Однореакторную облегченную по массе ядерную энергетическую установку предполагается установить на арктическом ледоколе с небольшой осадкой для обслуживания мелководных устьев сибирских рек. Эту задачу уже решают проектные и научные организации.

На Балтийском заводе в Ленинграде возвышается корпус нового атомного богатыря "Россия". Это усовершенствованный вариант ледокола типа "Арктика". Судостроители взяли обязательство спустить его на воду к 7 ноября 1983 г.

Имеются планы создания еще более мощных линейных арктических ледоколов, чем ледоколы серии "Арктика". Безусловно, это будут атомные ледоколы.

Перед атомным судостроением раскрываются новые горизонты. На капитанском мостике научного руководителя по ядерным силовым установкам транспортных и ледокольных судов надежный впередисмотрящий Николай Сидорович Хлопкин.



Капитан Хлопкин (1945 г.)



Рейхстаг повержен (второй справа – Н.С. Хлопкин)



Ледокол "Арктика" достиг в свободном плавании Северного полюса



В гостях у капитана Ю.С. Кучиева на ледоколе "Арктика"



Такая она — Арктика



Служба на ледоколе "Арктика" илет



В.А. Легасов и Н.С. Хлопкин у трапа атомного ледокола



В Кремле после вручения наград



Деловой контакт с министром Морского флота СССР Т.Б. Гуженко



Атомному ледоколу — 20 лет. Торжественное заседание в Мурманске



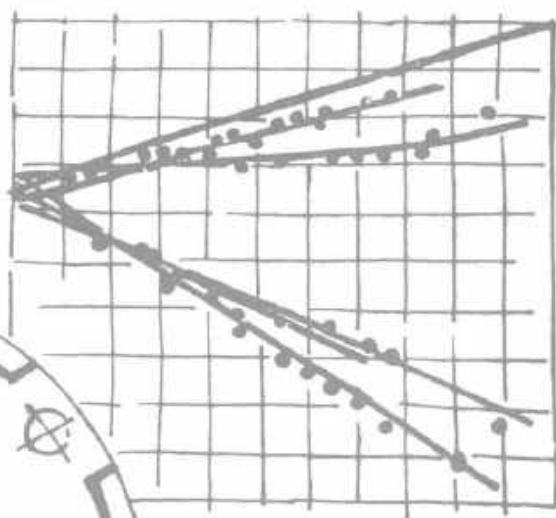
Доклад о развитии районов Крайнего Севера



Начальник отдела Н.С. Хлопкин докладывает
на партийном собрании



Кавказ надо мною



АТОМНЫЕ ЛЕДОКОЛЫ ИЗБРАННЫЕ ДОКЛАДЫ



Опыт эксплуатации атомной установки ледокола «Ленин»

И. И. Африкантов, Н. М. Мордвинов, П. Д. Новиков, Б. Г. Пологих,
А. К. Следзюк, Н. С. Хлопкин и Н. М. Царев

Атомный ледокол «Ленин» (рис. 1) вступил в строй арктического флота СССР 3 декабря 1959 г. и с этого момента ежегодно участвует в арктических навигациях. К концу 1963 г. он прошел около 60 000 миль, из них примерно

этих положительных качеств на ледоколе с энергетической установкой на химическом топливе практически недостижимо. Немаловажными эксплуатационными преимуществами применения ЯЭУ является возможность сохранения практи-



Рис. 1. Атомный ледокол «Ленин»

40 000 миль во льдах. Совместно с другими ледоколами атомный ледокол провел по Северному морскому пути более 300 судов. В октябре 1961 г. он доставил в исходный пункт оборудование и обслуживающий персонал дрейфующей станции «Северный полюс-10».

Применение ядерной энергетической установки (ЯЭУ) позволило создать ледокол, обладающий большой мощностью и автономностью плавания при ограниченных размерах корпуса, обеспечивающих достижение хорошей ледопроеходимости и маневренности. Совмещение

этих положительных качеств на ледоколе с энергетической установкой на химическом топливе практически недостижимо. Немаловажными эксплуатационными преимуществами применения ЯЭУ является возможность сохранения практи-

чески постоянного водоизмещения ледокола и работана полной мощности в течение длительного времени в сочетании с более уверенным использованием ледокола в тяжелых ледовых условиях. Использование мощного атомного ледокола на Северном морском пути способствует значительному увеличению скорости проводки судов в ледовых условиях и продлению сроков навигации. При этом исключается вынужденная зимовка судов во льдах, снижается число повреждений и возможность потери судов в условиях сжатия льдов. В этом отношении

показательна успешная проводка судов в Арктике в 1960 г., когда ледокол «Ленин» предотвратил угрозу гибели ряда судов в проливе Вилькицкого.

Длительная эксплуатация ледокола «Ленин» в условиях работы, которые в судовой практике относятся к наиболее тяжелым, показала, что ЯЭУ работает стабильно, легко управляется при резких изменениях нагрузки и обеспечивает все потребности судна в энергии. Вибро-ударостойкое оборудование ЯЭУ надежно работает как при ударах о лед, так и при качке.

В настоящее время реакторы ледокола работают на второй топливной загрузке. Перезарядка реакторов топливом была произведена весной 1963 г. На первой топливной загрузке каждый из реакторов проработал свыше 11 000 ч, выработав 430 000—490 000 *Мет·ч* тепловой энергии. При этом средняя энерговыработка по активной зоне достигла 11 000—13 000 *Мет·сутки/т* урана, а максимальная — около 30 000 *Мет·сутки/т* урана. Тепловыделяющие элементы находились в воде первичного контура примерно 30 000 ч.

Реакторы работали устойчиво на всех уровнях мощности, включая максимальный — 90 *Мет*. Полная мощность ледокола 44 000 л. с. обеспечивалась при одновременной работе трех реакторов на мощности 65 *Мет* каждый.

ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЯЭУ

ЯЭУ имеет общий вес, включая защиту, около 3100 т и рассчитана на выработку пара 360 т/ч при давлении 28 кг/см² и температуре 300—310° С. Общий вид ЯЭУ представлен на рис. 2.

На рис. 3 показана принципиальная схема ЯЭУ. Первичный контур состоит из трех автономных секций, каждая из которых включает

следующее оборудование: реактор, два парогенератора, четыре главных и два аварийных циркуляционных насоса, четыре компенсатора объема и два наобоименных фильтра. Секция имеет две петли — носовую и кормовую, что удобно как в работе, так и при проведении ремонта арматуры и оборудования. Основным режимом является работа с двумя петлями. При этом в каждой петле один главный циркуляционный насос находится в работе, а другой — в горячем резерве. Работа с одной петлей возможна на мощности до 50 *Мет* при включенных главном и аварийном циркуляционных насосах.

В процессе эксплуатации ЯЭУ были подтверждены проектные характеристики, что видно из данных таблицы, относящихся к режиму работы ледокола на полной мощности. Производительность насосов первичного контура оказалась несколько больше проектной величины, соответственно этому уменьшился подогрев воды в реакторе. Это особенно хорошо видно на рис. 4, где приводятся расчетные (кривая 1) и экспериментальные (кривая 2) зависимости температур на входе и выходе реакторов от их мощности.

В 1961 г. температурный режим реакторов был изменен с целью приближения его к условиям саморегулирования, когда температурный эффект практически полностью компенсируется эффектом Доплера. Как видно из рис. 4, в режиме саморегулирования на всех уровнях мощности температура воды на выходе из реактора практически остается постоянной (кривая 3). В течение кампании за счет изменения температурного и доплеровского эффектов характеристики, соответствующие режиму саморегулирования, несколько изменяются, однако это не вызывает необходимости перестройки системы регулирования.

Проектom механической установкой предусмотрена возможность питать от общесудовой

	Проект для 65 <i>Мет</i>	Эксплуатационные данные для реакторов		
		№ 1	№ 2	№ 3
Расход воды в петлях первичного контура, т/ч	415	435/430	458/467	435/453
Температура, °С				
на выходе из реактора (по петлям)	317	311/311	312/313	311/313
на входе в реактор	261	260	261	260
Паропродуктивность по петлям, т/ч	43,3/43,3	42/42	47/42	43/46
Давление пара, кг/см ²	29	32/31	31,5/30,5	31/31
Температура пара, °С	307	310/309	308/308	308/308
Мощность, рассчитанная по параметрам первичного контура, %	72,3	69,6	75,4	73,1
Мощность, рассчитанная по параметрам вторичного контура, %	68	67,3	71,1	71,3

Примечание. Цифра в числителе дроби относится к носовой петле; цифра в знаменателе дроби относится к кормовой петле.

магистральной всех потребителей пара: главные турбины, электростанции, испарительные установки и пр. В общей магистрали возможно с помощью запорной арматуры выделить секции с группами парогенераторов от одного или двух реакторов, которые снабжают паром

от парогенераторов этого реактора; при работе же на общую паровую магистраль оказывается возможным удерживать давление пара в ней за счет увеличения мощности на других реакторах, поэтому не возникает необходимость в полном отключении потребителей пара.

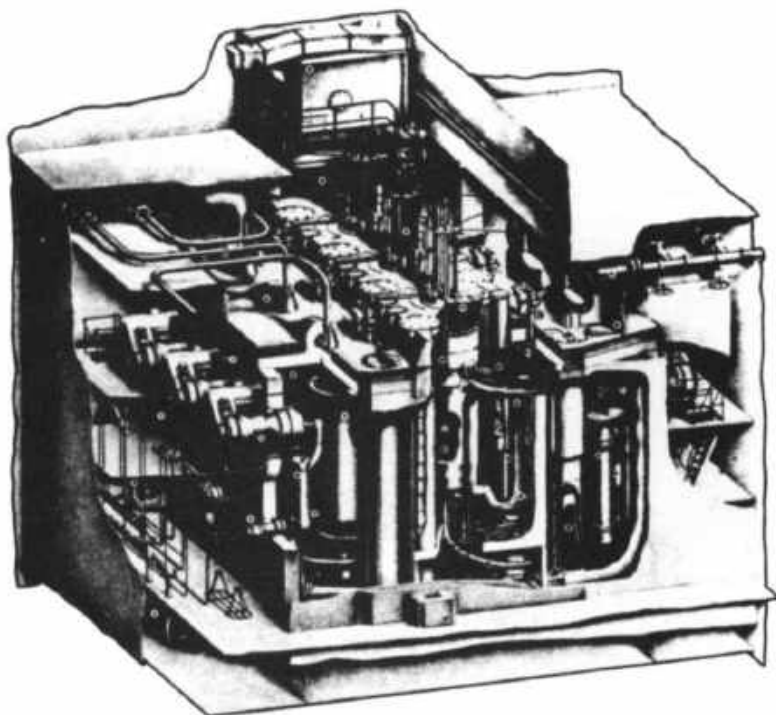


Рис. 2. Общий вид пароэнергетической установки:

1—теплообменник третьего и четвертого контуров; 2—насос внутреннего контура охлаждения; 3—трубопровод внешнего контура охлаждения; 4—вентили воздушников; 5—главный циркуляционный насос первичного контура; 6—аварийный циркуляционный насос первичного контура; 7—помещение датчиков теплоконтроля; 8—вентили системы дренажирования первичного контура; 9—теплоизоляция; 10—холодильник фильтра первичного контура; 11—парогенератор; 12—парогенераторное помещение; 13—защита выхода паропровода; 14—паропровод; 15—запасная цистерна теплоносителя; 16—помещение системы управления и защиты; 17—исполнительные механизмы системы управления и защиты; 18—ионизационная камера; 19—карболит; 20—реактор; 21—активная зона; 22—уровнемер; 23—биологическая защита вентиляционной шахты; 24—трубопровод первичного контура; 25—набор железо-водной защиты; 26—шахта хранения оборудования; 27—фильтр первичного контура; 28—бак железо-водной защиты; 29—бетон; 30—задвижка магистрали первичного контура; 31—коллектор паропровода; 32—люк в парогенераторное помещение; 33—теплообменник внутреннего контура охлаждения; 34—фильтр механической очистки; 35—компенсатор объема; 36—электронагреватели

отдельно носовой и кормовой эшелонам оборудования. Опыт показал, что работа всех парогенераторов на общую магистраль имеет определенные преимущества перед поэтапной схемой. При поэтапной подключении парогенераторов срабатывание аварийной защиты на одном из реакторов вызывает прекращение подачи пара к потребителям, питаемым

Вследствие этого снижается число переключений арматуры в переходных и аварийных режимах работы установки, что уменьшает вероятность ошибочных операций в наиболее ответственные моменты работы установки.

Опыт эксплуатации показал достаточность предусмотренных на ледоколе мероприятий для бесперебойного электропитания ЯЭУ, которое

осуществляется от двух электростанций мощностью 3000 *квт* каждая. В случае исчезновения напряжения на одной из электростанций происходит автоматический запуск двух аварийных дизель-генераторов мощностью 100 *квт* каждый и осуществляется ручной пуск резервного дизель-генератора мощностью 1000 *квт*.

По предложению эксплуатационного персонала с целью повышения надежности произведена замена запроектованной двухбортной релейно-контакторной схемы электропитания системы управления и защиты (СУЗ) реакторов на схему с полупроводниковыми вентилями.

см отработали без ревизии 8000—9000 ч. Несколько из них было выведено из действия вследствие снижения сопротивления изоляции обмоток статора. Аварийные циркуляционные насосы работали надежно. Паровая система компенсации обеспечивала высокую стабильность поддержания давления в первичных контурах на стационарных уровнях и не допускала колебаний давления более ± 5 ат в переходных процессах. В конструкциях нижней части компенсаторов объема происходит оседание активных продуктов коррозии, что усложняет демонтаж и замену электродвигате-

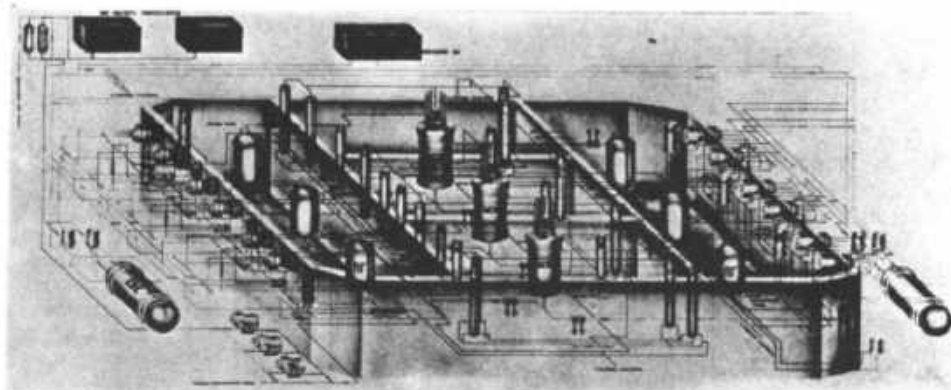


Рис. 3. Принципиальная схема установки:
контур теплоносителя; ПГ — парогенератор; КО — компенсатор объема; ГЦН — главный циркуляционный насос; АЦН — аварийный циркуляционный насос; Ф — ионообменный фильтр; ХФ — холодильный фильтр; Х — холодильник внутреннего контура охлаждения; ХВК — холодильник внешнего контура; НП — подпиточный насос

Важно отметить, что за весь период эксплуатации реакторов не было случаев отказа в срабатывании аварийной защиты. Исследования показали, что иногда, например при остановке одного из циркуляционных насосов первичного контура, нет необходимости сбрасывать мощность до нуля, а достаточно быстро автоматически снизить ее до уровня 30% — так называемого срабатывания аварийной защиты второго рода. В связи с этим часть сигналов, по которым ранее происходил сброс мощности до нуля, переведена в разряд сигналов аварийной защиты второго рода. Это повысило живучесть судна и уменьшило число реактивных качек оборудования. Автоматический сброс мощности до нуля получил наименование сброса аварийной защиты первого рода (АЗ I). Число таких сбросов защиты во время плавания ледокола на трассе Северного морского пути было невелико: приблизительно 6—8 раз на каждом из реакторов.

Оборудование первичных контуров энергетической установки ледокола проработало, включая 1963 г., в рабочих условиях (при давлении 180 *кг/см²* и температурах 250—310°С) около 15 000 ч. Главные циркуляционные насо-

лей. До настоящего времени эта работа не производилась.

Ионообменные фильтры позволяли поддерживать требуемое качество воды в первичных и вторичных контурах энергетической установки: удельное сопротивление 1—2 *Мом·см*; содержание ионов хлора не более 0,02 *мг/л* и значение pH = 6—8. В фильтрах в последнее время успешно используются ионообменные смолы КУ-2 и АВ-17. Практиковалось введение в воду вторичного контура гидразина. В начале эксплуатации механической установки ледокола имели место кратковременные увеличения содержания солей в питательной воде вторичного контура. Благодаря повышению качества отдельных узлов оборудования и усовершенствованию системы контроля в дальнейшем эти явления происходили редко и быстро локализовались. Следует отметить эффективность двойных трубных решеток конденсаторов и холодильников заборной воды, практически исключая подсосы морской воды.

Парогенераторы ЯЭУ работали устойчиво как в стационарных, так и в переходных режимах. В процессе эксплуатации имели место случаи нарушения герметичности их трубных систем.

Обнаружение и отключение парогенератора с негерметичностями выполнялось достаточно организованно и быстро. Благодаря этому во вторичном контуре наблюдалось лишь кратковременное возрастание активности с превышением фоновых значений всего в несколько раз. В запорной арматуре первичных контуров наблюдались случаи капельных протечек через сальники главных задвижек, связанные с усы-

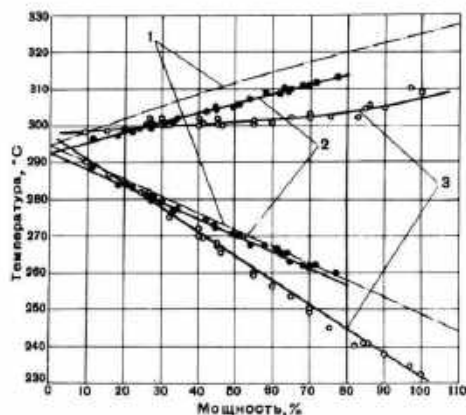


Рис. 4. Зависимость температур на входе и выходе реактора от его мощности

ханием уплотняющей набивки. Набивка была заменена более высококачественной, однако через каждые 1500—2000 ч требовалась подтяжка сальников. Недостаточно надежными оказались сальниковые клапаны дренажной системы первичных контуров. Требовалась ежегодная ревизия их.

По работе исполнительных механизмов СУЗ существенных замечаний не имеется.

Биологическая защита вокруг реакторов, оборудования и магистралей первичных контуров оказалась достаточной, в ней не наблюдалось каких-либо нарушений за счет воздействия ударных нагрузок, связанных с движением ледокола во льдах и за счет качки при плавании в штормовую погоду. Наблюдалось проникновение высокоактивных взвесей в некоторые импульсные трубки, выведенные из нижних точек трубопроводов. В местах выхода этих трубок за пределы биологической защиты к датчикам контрольно-измерительных приборов происходило повышение уровней γ -излучения, поэтому потребовалась установка местной дополнительной защиты.

В связи с проведением ремонтных работ по ЯЗУ ледокола выявилась необходимость в расширении санитарного пропускника на входе в зону строгого режима и увеличении объемов хранения жидких и твердых отходов. Согласно этому произведено соответствующее переоборудование санпропускника и хранения.

Приборы дозиметрии обеспечивали надлежащий контроль за радиационной обстановкой на ледоколе и активностями в технологических контурах атомной установки. Часть дозиметрических приборов в процессе эксплуатации была заменена на более совершенные новые образцы. Была усовершенствована система контроля активных газов.

Результаты индивидуального контроля персонала, обслуживающего атомную установку, показали, что интегральная доза облучения у подавляющего числа контролируемых лиц не превосходит третьей части или половины предельно допустимой дозы (5 бэр/год). Только несколько лиц, производивших радиационно-опасные работы, связанные с дезактивацией помещений, где имели место утечки воды из первичного контура, получили дозы, близкие к предельно допустимой^{3,4}.

НЕЙТРОННО-ФИЗИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ АКТИВНОЙ ЗОНЫ

Конструкция реактора описана в докладе¹. Активная зона состоит из 219 рабочих каналов, расположенных в узлах правильной треуголь-

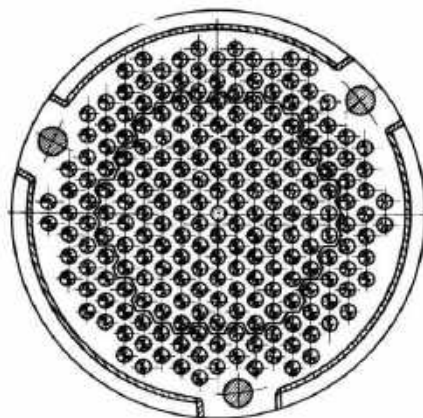


Рис. 5. Поперечный разрез активной зоны

ной сетки с шагом 64 мм (рис. 5); ее высота составляет 1,6 м, эквивалентный диаметр 1 м.

В каждый из трех реакторов при первой топливной загрузке было помещено 80 кг U^{235} . Активная зона рассчитана на работу в течение 200 суток при максимальной мощности 90 Мвт. За это время выгорает $1/3$ начального количества топлива. Исходный запас в коэффициенте размножения, соответствующий столь глубокому выгоранию ($\rho = 14\%$), уменьшен вдвое за счет введения в кожуховые трубы каналов В¹⁰ в количестве 92 г на реактор (для первой загрузки). Бор размещен в активной зоне неравно-

мерно: его концентрация уменьшается от оси реактора к периферии; внешний ряд каналов не содержит бора.

Рабочий канал (рис. 6) содержит пучок из 36 цилиндрических тепловыделяющих элементов,



Рис. 6. Поперечный разрез рабочего канала и тепловыделяющего элемента

снабженный дистанционирующим каркасом. Внешний диаметр тепловыделяющих элементов равен 6,1 мм, номинальный зазор между ними в собранном пучке составляет 1,5 мм. Покрyтия элементов имеют толщину 0,75 мм. У первой

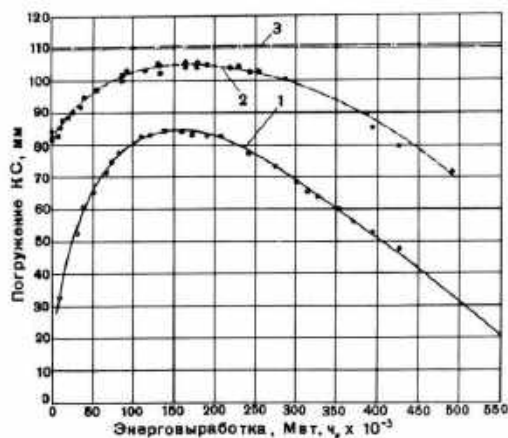


Рис. 7. Величина погружения компенсирующей системы (КС) в активную зону в зависимости от энерговыработки первого реактора

топливной загрузки кожуховые трубы рабочих каналов, оболочки тепловыделяющих элементов и каркасы сделаны из циркониевого сплава. Топливом служат таблетки из спеченной двуокиси урана со средним обогащением 5%.

Результаты петлевых испытаний не могли дать экспериментальной информации о процессах, связанных с выгоранием топлива при реальных положениях органов компенсации и искажениях нейтронных полей. Эти данные могли быть получены в результате выжигания топлива активной зоны в целом.

Активная зона реактора была разработана на основании расчетных данных. Расчеты производились на быстродействующей электронной вычислительной машине по двум стандартным одномерным программам (радиальной и высотной).

В основу расчета параметров размножения в решетке рабочих каналов была положена аппроксимационная методика, основанная на внесении в обычную классическую модель для реакторов на тепловых нейтронах эмпирических поправок, следующих из обработки большого числа критических опытов.

До начала работы реакторов на ледоколе были проведены исследования активной зоны на стенде. При этом были окончательно отработаны конструкции активной зоны, систем регулирования и компенсации реактивности.

На рис. 7 приведена величина погружения в активную зону компенсирующей системы в зависимости от энерговыработки первого реактора при длительной работе его в интервале мощностей от 40 до 60 Мвт.

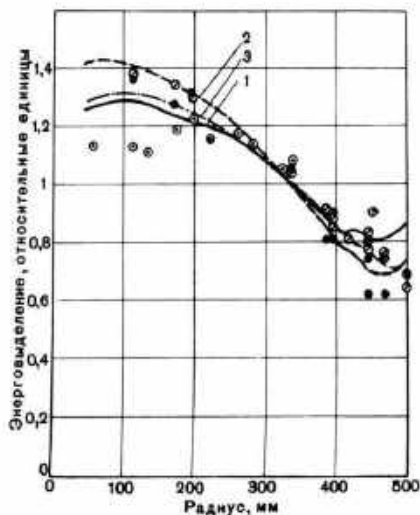


Рис. 8. Распределение энерговыделения по радиусу активной зоны

Расчетная кривая 1 вычислена по одномерной аксиальной программе. С ней хорошо согласуются экспериментальные точки, соответствующие положениям системы компенсации при длительной работе реактора на стационарных уровнях мощности. Таким образом, несмотря на приближенность расчетной модели, теоретическое описание дает вполне удовлетворительные результаты.

Быстрое погружение компенсирующей системы в начале кампании объясняется превалирующей ролью выгорания бора: освобождение

реактивности из-за выгорания бора не компенсируется ее потерей из-за выгорания U^{235} . Равновесие наступает лишь через 70 суток работы реактора на максимальной мощности.

Правая ветвь имеет меньшую кривизну, что объясняется освобождением слабо выгоревших участков рабочих каналов при выводе системы компенсации из активной зоны. На том же рис. 7 нанесены отдельные точки, соответствующие положениям компенсирующей системы реакторов в разотравленных состояниях, при температурах 40—80°С и максимальных значениях реактивности (кривая 2). Минимальная подкритичность реактора при положении компенсирующей системы на нижних концевых выключателях (кривая 3) и при полностью извлеченных из активной зоны стержнях регулирования и аварийной защиты в течение кампании составляет $1 \div 1,5\%$. Это обеспечивает надежное запирание реактора.

Перед выводом реакторов на рабочий режим было измерено радиальное распределение энерговыделения по активности рабочих каналов, облученных в активной зоне при температуре около 20°С и минимальном уровне мощности. Радиальный коэффициент неравномерности энерговыделения для этого случая оказался равным 1,2 (рис. 8). Расчетная кривая 1 относится к неравномерностям горячего отравленного реактора по рабочим каналам и не учитывает наличия толстостенных стальных чехлов, в которых перемещаются стержни регулирования и аварийной защиты, сгруппированных вблизи оси реактора. Этим объясняется несоответствие расчетных и опытных данных для центральных каналов.

В процессе работы реактора изменения формы поля энерговыделения контролировались замером перепада температур на рабочих каналах с помощью термометров сопротивления. К моменту достижения максимума реактивности (при энерговыработке около 160 000 Мвт·ч)

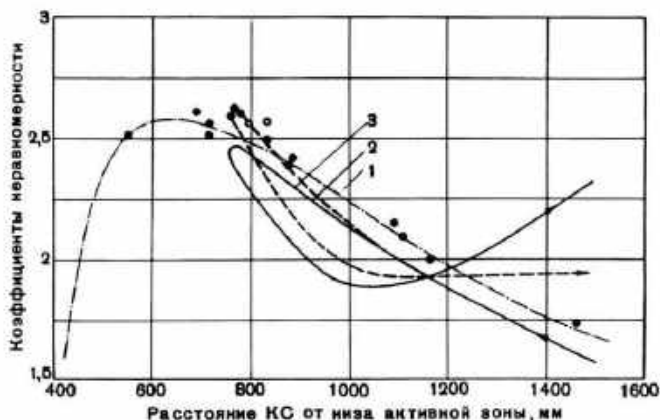


Рис. 9. Коэффициенты аксиальной неравномерности поля тепловых нейтронов и энерговыделения при различных положениях КС. Экспериментальные значения:

● — минимально контролируемая мощность в начале кампании; ○ — 18 Мвт и 60 000 Мвт·ч; ○ — 55 Мвт и 700 000 Мвт·ч; × — 54 Мвт и 110 000 Мвт·ч; ◐ — для 55 Мвт и 160 000 Мвт·ч.

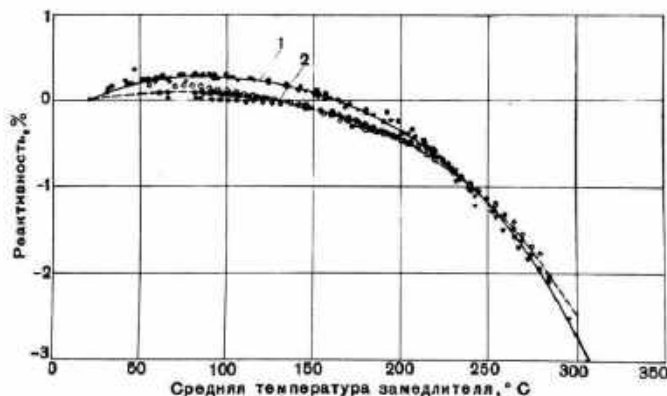


Рис. 10. Температурный эффект реактивности. Экспериментальные точки при разогреве:

●, ○ — от внешнего источника тепла; △, ○ — собственным теплом; ○ — точки при расхолаживании реактора

радиальная неравномерность энерговыделения из-за выгорания бора в центре реактора стала максимальной — около 1,42 (см. рис. 8, кривая 2). В интервале энерговыработки от 160 000 до 420 000 *Мвт·ч* радиальная неравномерность энерговыделения несколько улучшается за счет более интенсивного выгорания U^{235} в центре активной зоны и достигает величины 1,28 (кривая 3).

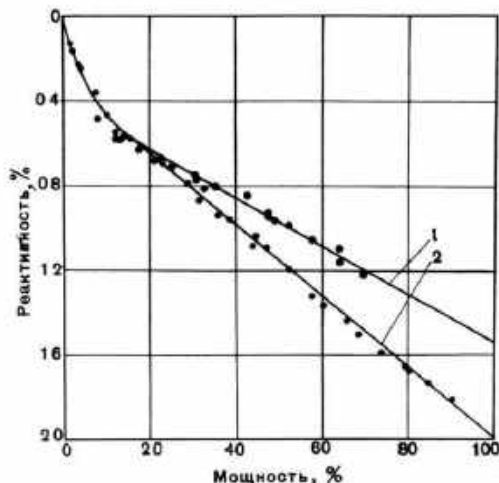


Рис. 11. Изменение реактивности за счет эффекта Доплера

Расхождение расчетов с экспериментом объясняется в данном случае погрешностью в измерении температур и приближенным учетом аксиальной составляющей при выполнении расчетов.

На рис. 9 приведены значения коэффициентов аксиальной неравномерности поля тепловых нейтронов и энерговыделения при различной величине погружения системы компенсации реактивности и различных условиях работы реактора. Расчетная кривая 1 для коэффициента неравномерности нейтронного поля, соответствующая холодному неотравленному реактору в начале кампании, хорошо совпадает с экспериментальными точками. Измерения проводились при помощи малогабаритных счетчиков деления, перемещавшихся внутри стальных чехлов автоматических регуляторов. Изменение аксиальной неравномерности поля тепловых нейтронов в течение кампании при работе реактора на мощности 50 *Мвт* представлено кривой 2. Экспериментальные точки, относящиеся к этой кривой, получены по активации медной проволоки на уровнях мощности от 18 до 55 *Мвт*. Кривая 3 представляет зависимость аксиальной неравномерности энерговыделения.

Необходимо отметить, что выгорание топлива

вдоль оси рабочих каналов происходит более равномерно, чем это следует из приведенных на рис. 9 коэффициентов неравномерности энерговыделения. За счет перемещения области с максимальными значениями потока нейтронов вдоль оси реактора кривая выгорания топлива имеет в центральной области плато (протяженность около 80 см) с глубиной выжигания до 47% от исходного количества U^{235} .

На рис. 10 приведены кривые, иллюстрирующие изменение температурного эффекта реактивности. Они относятся к началу кампании (кривая 1) и к моменту достижения энерговыработки около 430 000 *Мвт·ч* (кривая 2). Влияние фактора геометрии активной зоны исключено как в том, так и в другом случае; величины погружения компенсирующей системы были практически одинаковыми. Разогрев активной зоны производился как от постоянного источника тепла, путем подачи пара в парогенераторы со стороны вторичного контура и циркуляции теплоносителя в первичном контуре, так и при разогреве собственным теплом на мощности 1—10 *Мвт*.

На рис. 11 представлено изменение реактивности для начала кампании (кривая 1) и при энерговыработке около 430 000 *Мвт·ч* (кривая 2) в зависимости от мощности. До уровня мощности 10% данные получены путем скачкообразных введений в реактор положительных реактивностей различных величин и определения уровней мощности, на которых выходил реактор.

Величины эффекта Доплера на мощностях свыше 10% определялись при постоянной циркуляции теплоносителя и быстром подъеме и снижении мощности, а также при постоянном температурном уровне замедлителя и переменной циркуляции воды через реактор. В результате вносились соответствующие поправки, исключающие влияние разогрева замедлителя. В конце кампании наблюдается увеличение эффекта Доплера, связанное, по-видимому, с изменением структуры и теплопроводности материала сердечника.

В период эксплуатации реакторов ледокола «Ленин» производились периодические измерения эффективности автоматических регуляторов.

В начале кампании эффективность одной группы стержней автоматического регулирования (3 стержня) составляла 0,36%. В момент максимума реактивности при достижении энерговыработки около 160 000 *Мвт·ч* эффективность группы регуляторов возросла до 0,7% и практически сохранилась на этом уровне до конца кампании.

Указанное возрастание эффективности стержней связано в основном с увеличением поля нейтронов в области их расположения, а также с возрастанием длин диффузии тепловых нейтронов в активной зоне по мере выгорания топлива и бора.

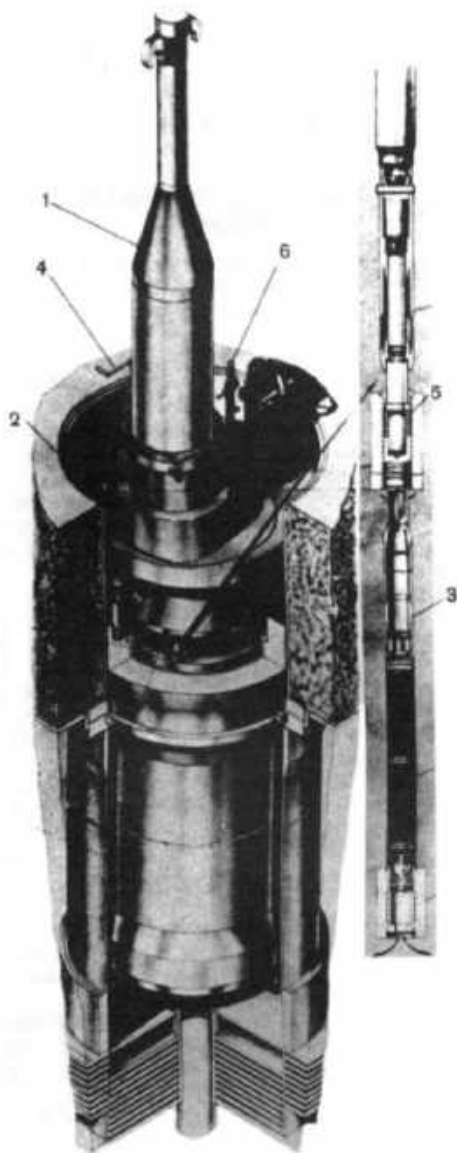


Рис. 12. Реактор с перегрузочным устройством

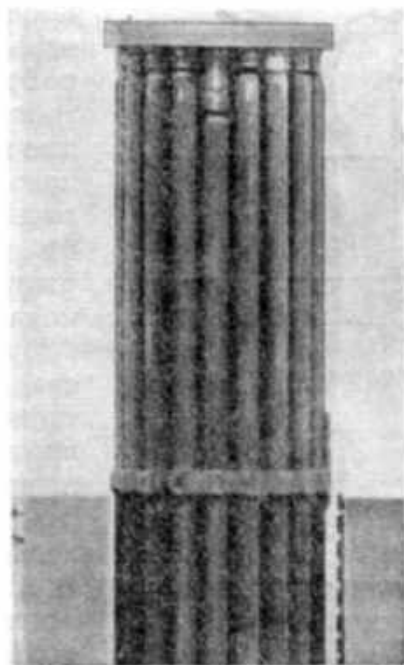


Рис. 13. Канал с тепловыделяющими элементами после удаления наружного кожуха.



Рис. 14. Поперечный шлиф тепловыделяющего элемента после энергосработки около 15 000 Мат-сутки/т урана

ПЕРЕЗАРЯДКА РЕАКТОРОВ И ИХ БАЗОВОЕ ОБСЛУЖИВАНИЕ

Весной 1963 г. произведена первая перезарядка реакторов ледокола. Для этой операции использовалось вспомогательное судно «Лепсе».

Теплоход «Лепсе» оборудован хранилищем для отработавших каналов и перегрузочными устройствами, включающими поворотный край грузоподъемностью 12 т, защитные контейнеры для выгрузки рабочих каналов и стержней СУЗ, наводящее устройство для установки перегрузочного контейнера на соответствующую ячейку реактора и пр. Для перезарядки реакторов использовался также край ледокола.

Сущность операций по разгрузке реактора сводится к следующему. Перегрузочный контейнер 1 (рис. 12) устанавливается на защитной плите наводящего устройства 2 над предполагаемым к разгрузке каналом 3. С помощью ручной лебедки 4 внутри контейнера опускается канговый захват 5, который зацепляет канал за его головку. Контроль за работой кангового захвата производится через перископ 6. Затем с помощью ручной лебедки канал поднимается в контейнер. Внизу контейнера закрывается защитный шибер, и контейнер с каналом подается крапом ледокола на теплоход «Лепсе» для выгрузки его в хранилище.

В случае механического заклинивания канала в ячейке реактора страгивание его с места производится домкратом. Число таких заклиниваний при разгрузке реакторов было невелико. Среднее время разгрузки одного канала составляло 15–20 мин. Общее время разгрузки реактора заняло около трех суток.

Исследования выгруженных из реакторов ледокола тепловыделяющих элементов показали, что они находятся в хорошем состоянии (рис. 13). Тепловыделяющие элементы не имеют вадутый, искривлений и признаков истирания. Заметных изменений диаметра стержней также не наблюдалось. Поверхности оболочек покрыты тонким слоем отложений темного цвета толщиной несколько микрон.

На рис. 14 представлен поперечный шлиф тепловыделяющего элемента после энергосварки около 15 000 Мат.сутки/т урана.

Сердечник тепловыделяющего элемента имеет трещины, однако несмотря на это, зазор между сердечником и оболочкой сохранился. Температуры в центре сердечника не были близкими к температуре плавления двуокиси урана, о чем свидетельствует отсутствие центрального отверстия в таблетке и аномального роста зерна. После извлечения из реакторов всех каналов производилась промывка реакторов вместе с первичными контурами.

Во время загрузки каналы опускались в активную зону при погруженных в нее всех штатных поглотителях и дублированным контроле за изменением плотности нейтронов. Операции

по загрузке каналами активной зоны одного реактора занимали время 6–10 ч.

После загрузки в реакторы новых более усовершенствованных каналов был осуществлен контрольный физический пуск с последующей проверкой физических весов органов регулирования и защиты реакторов. Новые каналы имели те же геометрические размеры, но были изготовлены по более совершенной технологии. В один из реакторов были загружены тепловыделяющие элементы со стальными оболочками.

Работы по перезарядке реакторов ледокола производились в районе Мурманска, где расположен причал и имеется минимально необходимое оборудование и снабжение для обслуживания ледокола «Ленин».

ПОДГОТОВКА ОБСЛУЖИВАЮЩЕГО ПЕРСОНАЛА

Инженерный персонал, обслуживающий атомную установку ледокола, прошел специальную подготовку в Ленинградском высшем инженерном морском училище им. адмирала С. О. Макарова. После этого он стажировался на атомных станциях. Курсы обучения и стажировки по управлению реакторами заканчивались сдачей экзаменов государственной комиссии. В дальнейшем сдача экзаменов на рабочее место производилась ежегодно.

Рядовой обслуживающий персонал атомной установки ледокола приобрел необходимый опыт работы на предприятиях атомной промышленности.

Первые два года эксплуатации явились годами освоения атомной установки. В этот период были выявлены ее преимущества и недостатки, намечены пути совершенствования управления и отработаны переходные процессы. При этом обслуживающий персонал атомно-механической установки проявил большую творческую инициативу и внес интересные предложения по реконструкции схем управления и отдельных узлов установки. Часть этих предложений уже реализована.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Длительная эксплуатация атомной паропроизводительной установки на ледоколе позволила всесторонне оценить ее работоспособность в различных условиях плавания.

Принципиальная схема и компоновка атомной установки оказались удачными, а предусмотренное резервирование оборудования вполне достаточным.

За все время эксплуатации ледокола не наблюдалось переоблучения обслуживающего персонала. Атомная установка оказалась настолько надежной, что во время работы требовалось всего лишь разовое посещение в сутки отсека с атомной установкой для осмотра расположенного в нем оборудования.

Первый опыт создания атомной установки на ледоколе оказался вполне успешным. Техническая целесообразность сооружения атомных ледоколов большой мощности для обслуживания Северного морского пути подтвердилась.

Экспериментальные нейтронно-физические характеристики активных зон реакторов ледокола были получены Н. А. Лазуковым, А. К. Следаюком и сотрудниками при подготовке доклада и рейсовых отчетов эксплуатационного персонала ледокола «Ленин».

ЛИТЕРАТУРА

1. А. П. Александров и др. Труды Второй международной конференции по мирному использованию атомной энергии, Женева, 1958, P/2140.
2. Ю. В. Сивинцев и Б. Г. Пологих. Труды Второй международной конференции по мирному использованию атомной энергии, Женева, 1958, P/2518.
3. В. К. Коваленко и др. Атомная энергия, 15, вып. 2, 152—155 (1963).
4. Санитарные правила работы с радиоактивными веществами и источниками ионизирующих излучений. М., Атомиздат, 1960.

НОВАЯ АТОМНАЯ УСТАНОВКА ЛЕДОКОЛА "ЛЕНИН"

Ф. М. МИТЕНКОВ, З. М. МОВШЕВИЧ, Б. Г. ПОЛОГИХ,
А. К. СЛЕДЗЮК, Н. С. ХЛОПКИН

Государственный Комитет по использованию
атомной энергии СССР, Москва,
Союз Советских Социалистических Республик

Abstract-Résumé-Аннотация-Resumen

THE NEW ATOMIC POWER PLANT FOR THE ICEBREAKER "LENIN".

Experience in the operation of the icebreaker "Lenin" has shown that the use of atomic power plants in large-capacity icebreakers presents great advantages over the use of organic-fuelled plants. In 1966, after six years of service, the "Lenin" underwent a complete overhaul, which included modernization of the steam-generating equipment. The new equipment has very much improved technical, economic and operational characteristics; in addition, the number of reactors has been reduced from three to two. The new plant is much less difficult to overhaul. The new design features of the nuclear power plant have resulted in a considerable reduction in the amount of liquid and solid waste that has to be dealt with at the time of overhaul. The power plant embodies a higher degree of automation. The steam-raising plant has automatic, remote control, and the transient processes in normal and accident conditions are automated. Integrated solutions have been found to problems relating to the interaction of the control systems for the steam-raising plant, the mechanical power plant, and the electric propulsion motors. Tests carried out on the new nuclear power plant confirmed that the design characteristics had been correctly chosen and indicated stable and reliable operation under all normal and accident conditions.

LA NOUVELLE INSTALLATION ATOMIQUE A BORD DU BRISE-GLACE « LÉNINE ».

L'expérience de l'exploitation du brise-glacé atomique « Lénine » a mis en évidence les avantages qu'offrent les grands brise-glaces à propulsion nucléaire par rapport à ceux qui utilisent un combustible organique. En 1966, après six campagnes de navigation, le brise-glacé « Lénine » a fait l'objet d'une révision générale. Cette remise en état s'est accompagnée d'une modernisation du système de production de vapeur. La nouvelle installation dispose de caractéristiques techniques et économiques sensiblement améliorées, bien que le nombre des réacteurs ait été ramené de trois à deux. Les réparations en sont grandement facilitées. Les solutions originales adoptées pour la disposition des générateurs nucléaires à bord du brise-glacé permettent de diminuer sensiblement le volume des déchets radioactifs liquides et solides pendant les travaux de réparation. La nouvelle installation de production d'énergie a été encore plus automatisée. Le réglage de la production de vapeur se fait par commande automatique et par télécommande; les processus transitoires sont également automatisés, tant pour le régime normal que pour les installations de secours. La question de l'interconnexion entre les commandes du générateur de vapeur, les dispositifs électromécaniques et les électromoteurs du système de propulsion a été résolue sous tous ses aspects. Les essais de la nouvelle installation nucléaire ont montré que toutes ses caractéristiques étaient conformes aux prévisions et que toutes les machines, normales et de secours, étaient en bon état de marche.

НОВАЯ АТОМНАЯ УСТАНОВКА ЛЕДОКОЛА "ЛЕНИН".

Опыт эксплуатации атомного ледокола "Ленин" показал существенные преимущества ледоколов большой мощности с атомными энергетическими установками, по сравнению с ледоколами с установками на органическом топливе. В 1966 году, после шести навигаций, ледокол "Ленин" был поставлен на капитальный ремонт. Этот ремонт был совмещен с модернизацией паропроизводящей установки. Новая паропроизводящая установка ледокола обладает гораздо лучшими технико-экономическими и эксплуатационными показателями; при этом число реакторов уменьшено с трех до двух. Ремонтопригодность новой установки существенно улучшена. Новые решения по компоновке ядерной энергетической установки на ледоколе позволяют значительно сократить объем жидких и твердых радиоактивных отходов на нем в период ремонта. В новой ядерной энергетической установке повышена степень автоматизации. Обеспечено автоматическое и дистанционное управление

паропроизводящей установки, автоматизированы переходные процессы в нормальных и аварийных режимах. Комплексно решен вопрос взаимосвязи систем управления паропроизводящей и энергомеханической установок, а также гребных электродвигателей. Проведенные испытания новой ядерной энергетической установки подтвердили все заложенные в проекте характеристики, показали устойчивую и надежную работу во всех нормальных и аварийных режимах.

НУЕВА ИНСТАЛАЦИОН АТОМКА ДЕЛ РОМПЕИЕЛОС «ЛЕНИН».

Ла experiencia de explotación del rompehielos «Lenin» ha demostrado las importantes ventajas de los rompehielos de gran potencia accionados por energía atómica en comparación con los alimentados con combustible orgánico. En 1966, después de seis campañas, el rompehielos «Lenin» fue sometido a reparación general, al tiempo que se modernizaban los generadores de vapor. Los datos técnicoeconómicos y de explotación de estos nuevos generadores son mucho más favorables; además, el número de reactores se redujo de tres a dos. La facilidad de reparación de las nuevas instalaciones ha mejorado considerablemente. Las soluciones adoptadas en cuanto a la concepción del nuevo sistema energético nuclear del rompehielos permiten reducir considerablemente el volumen de los desechos radiactivos líquidos y sólidos durante los trabajos de entretenimiento. El grado de automatización del sistema es más elevado. El control del generador de vapor se efectúa automáticamente y a distancia; se han automatizado los procesos transitorios en condiciones normales y en caso de avería. Se ha resuelto la compleja cuestión de las interacciones de los sistemas de regulación del generador de vapor, de la instalación energeticomecánica y de los electromotores de la hélice. Los ensayos efectuados con la nueva instalación de energía nuclear han confirmado todas las características previstas en el proyecto y demostrado el funcionamiento regular y seguro de la misma en condiciones normales y en caso de avería.

Эксплуатация атомного ледокола "Ленин" показала существенные преимущества ледоколов большой мощности с атомными энергетическими установками, обладающими практически неограниченной автономностью по запасам топлива, по сравнению с ледоколами на органическом топливе.

В 1966 году, после шести навигаций, ледокол "Ленин" был поставлен на капитальный ремонт. Этот ремонт был совмещен с модернизацией паропроизводящей установки (ППУ), которая к тому времени в значительной части устарела. Основные идеи ее были заложены в 1953 году, когда опыт разработки судовых установок был еще не достаточен.

Было признано целесообразным установить на ледоколе атомную ППУ, спроектированную к этому времени для более мощных ледоколов. Новая ППУ обладает существенно лучшими технико-экономическими и эксплуатационными показателями по сравнению с атомной ППУ, которая была установлена ранее на ледоколе "Ленин".

Новая атомная ППУ состоит из двух идентичных автономных блоков. Каждый из них включает в себя реактор водо-водяного типа под давлением, четыре парогенератора, четыре циркуляционных насоса первого контура (ЦНПК), компенсаторы объема (КО), холодильник фильтра, фильтр и другое оборудование.

Как и ранее, атомная установка размещена в отдельном отсеке, имеющем центральный отсеком. Вход в него осуществлялся через санпропускник.

Общий вид блока дан на рис. 1.

Надежная и устойчивая работа реакторов ледокола "Ленин" во всех условиях, связанных с движением ледокола во льдах (качка, вибрация, ударные воздействия), позволила уменьшить число реакторов на ледоколе с трех до двух, при этом был достигнут выигрыш в эксплуатационных расходах, в капитальных затратах, в весовых и габаритных показате-

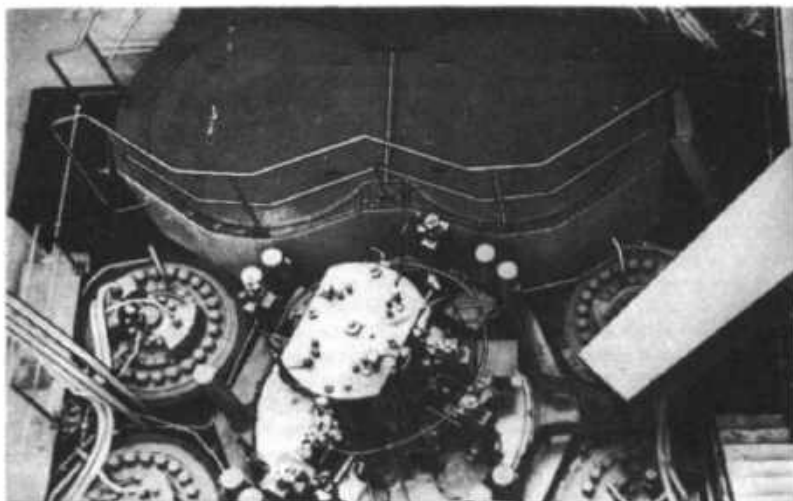


Рис.1. Общий вид автономного блока паропроизводящей установки.

лях ППУ. Два реактора обеспечивают ледоколу возможность выйти своим ходом из льдов и вернуться на базу в любых, даже самых серьезных случаях, связанных с неполадками в работе оборудования и систем.

Проработки ППУ показали возможность существенного упрощения первого контура. Может быть убрана крупная арматура на основных магистралях первого контура; соответственно, протяженность трубопроводов первого контура существенно сокращена. Одновременно с этим относительно просто решается вопрос с подводом и выводом труб первого контура в верхней части корпуса реактора, что немаловажно, поскольку при таком решении уменьшается потенциальная опасность ухода воды из активной зоны в случае крупной течи первого контура.

Стало возможным уменьшить число насосов первого контура (были исключены насосы аварийного расхолаживания и осуществлен переход на двухскоростные ЦНПК). Такое решение в новой установке привело к наличию в каждой петле реактора всего лишь по одному насосу, вместо трех в первой ППУ.

В прежней компоновке атомной установки ледокола ремонтные работы с оборудованием первого контура были связаны с вскрытием нескольких помещений и требовали в ряде случаев больших сопутствующих работ. Это создавало излишние сложности и приводило к неоправданному увеличению расходов на ремонт. Ремонтопригодность новой установки существенно улучшена.

Опыт показал надежную работу ионообменных фильтров. Водный режим первого контура поддерживался всегда в пределах заданных нормативов. С целью сокращения оборудования первого контура достаточно иметь для каждого реактора не два, а один ионообменный фильтр. Ионообменные смолы — анионит и катионит — могут быть загружены в виде смешанного слоя. Загрузка и выгрузка их легко осуществляется гидравлическим путем.

Вода внутреннего контура охлаждения, циркулирующая через бак биологической защиты, имеет низкую активность. Использование фильтра в этом контуре позволяет держать удельную активность воды ниже 10^{-6} Ки/л. В связи с этим нет необходимости размещать все оборудование и трубопроводы контура внутреннего охлаждения внутри биологической защиты. Это приводит к существенной экономии в размерах и весе биологической защиты, особенно вследствие вынесения из-под защиты теплообменников.

Новые решения по компоновке ядерной энергетической установки (ЯЭУ) на ледоколе позволяют существенно сократить объем жидких и твердых радиоактивных отходов на нем в период ремонта. Временные хранилища этих отходов на ледоколе решены в более удобном для эксплуатации варианте. Представилось возможным соединить помещения ЯЭУ вертикальным грузовым лифтом с выходом: внизу — в хранилище твердых радиоактивных отходов, вверх — на верхнюю перегрузочную площадку.

Корпусной вариант водо-водяного реактора на ледоколе сохранен и для новой ЯЭУ. Признано лишь возможным для повышения надежности ППУ снизить давление внутри первого контура. В новом варианте ЯЭУ в качестве рабочего давления выбрано 130 ата. При этом имеется в виду, что при наиболее неблагоприятном сочетании допусков кратковременно может возникать объемное кипение воды на выходе из отдельных топливных кассет.

Характеристики установки приведены в табл. I.

В целом компоновка оборудования первого контура выполнена следующим образом.

Для обеспечения надежности и безопасности паропроизводящая установка размещена в газоплотном отсеке и разделена по высоте на два помещения — реакторное (нижнее) и аппаратное помещение (верхнее).

Реакторное помещение отделено от аппаратного помещения блоками биологической защиты и герметичным настилом. Установки по реакторному помещению разделены между собой герметичной выгородкой.

ТАБЛИЦА I. ХАРАКТЕРИСТИКИ НОВОЙ ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ ЛЕДОКОЛА "ЛЕНИН"

Наименование	Единица измерения	Численные значения (после модернизации)
Суммарная мощность на фланцах ГТГ	л. с.	44 000
Количество автономных ППУ	шт.	2
Вес ППУ	т	2300
Продолжительность работы ледокола на полной мощности без перезарядки	час	11 000-16 000
Давление в системе первого контура	кг/см ²	130
Температура первичного теплоносителя на номинальной мощности:		
на входе в активную зону,	°C	273
на выходе из активной зоны	°C	318

Основное и вспомогательное оборудование каждой установки располагается в кессонах бака железо-водной защиты (ЖВЗ). Баки ЖВЗ отделены от прочной газоплотной оболочки коффердамами. Оборудование, расположенное в аппаратном помещении, не требует постоянного обслуживания. При необходимости вход в помещение осуществляется через штатные герметичные двери. Для исключения протечек воздуха из помещений ППУ в них постоянно поддерживается разрежение.

Соединение основного оборудования — реактора, парогенераторов и гидрокамер — выполнено при помощи коротких силовых патрубков. Все оборудование расположено вертикально, что обеспечивает легкий доступ к нему при ремонтных работах. Блоки биологической защиты — малогабаритные, а разбивка и конфигурация выбраны таким образом, что в случае их демонтажа производится минимальный объем сопутствующих работ.

Арматура вспомогательных трубопроводов первого контура вынесена в специальную выгородку, легко доступную для осмотра и производства ремонтных работ. Все разъемы основного оборудования расположены выше блоков биологической защиты, что позволяет вести ремонтные работы в более благоприятной радиационной обстановке.

В ППУ имеется система дезактивации.

Для проведения всех ремонтных работ предусмотрены грузоподъемные средства. Ремонт или замена съемных частей всего оборудования, расположенного в аппаратном помещении (как то: активной зоны реактора, трубной системы парогенераторов, насосов первого контура, арматуры и т. д.), обеспечивается без разгерметизации реакторного помещения.

Реактор изготовлен из низколегированной теплостойкой стали и представляет собой толстостенный сосуд с эллиптическим днищем. Внутренняя поверхность корпуса и днища облицованы антикоррозионной наплавкой. Герметичное соединение корпуса и крышки осуществляется при помощи самоуплотняющейся прокладки. Внутри корпуса размещена активная зона. На периферии активной зоны расположены экраны, используемые для направления потока теплоносителя и для защиты корпуса от излучения активной зоны. В отличие от первой атомной установки ледокола активная зона имеет одноходовое исполнение.

Активная зона реакторов ледокола состоит из 241 рабочих кассет, расположенных в узлах правильной треугольной решетки. Кассета представляет собой пучок стерженьковых твэлов, заключенных в кожуховую трубу из циркониевого сплава.

Компенсация реактивности, обусловленной температурным эффектом, отравлением, а также изменением реактивности в процессе кампании и необходимой подкритичностью реактора в заглушенном состоянии, осуществляется системой поглощающих стержней. Стержни (карбид бора) перемещаются в межканальном пространстве в специальных циркониевых направляющих трубах. Запроектированная схема перемещения компенсирующих стержней позволяет обеспечить оптимальное распределение энерговыделения в активной зоне в течение всей кампании.

Система аварийной защиты (АЗ) состоит из 16 поглощающих стержней, объединенных в четыре независимые группы, которые вводятся в активную зону по аварийному сигналу. Система компенсации реактивности и АЗ полностью удовлетворяют действующим требованиям по ядерной безопасности.

Детальные физические расчеты при проектировании активной зоны производились по двумерной двухгрупповой программе с выгорающим, учитывающей изменение положения стержней компенсации в процессе кампании.

Активная зона обладает свойством саморегулирования. Благодаря отрицательному температурному коэффициенту реактивности реактор может работать в режиме саморегулирования, что позволяет упростить систему управления и отказаться от автоматических регуляторов. Качество переходных режимов и по времени установления режима, и по отклонению параметров вполне удовлетворительное.

Управление мощностью реактора осуществляется изменением расхода питательной воды.

Главный циркуляционный электронасос представляет собой единый агрегат, состоящий из герметичного двигателя и центробежного насоса.

Парогенератор выполнен в виде вертикальной цилиндрической камеры с эллиптическим днищем. Внутри корпуса размещена трубная система, своей верхней частью закрепленная в крышке.

Движение теплоносителя первого контура происходит в межтрубном пространстве. С целью повышения ремонтпригодности трубная система разделена на 20 автономных парогенерирующих секций. При необходимости любая из поврежденных секций может быть заглушена.

Предусмотрена также возможность замены трубной системы парогенератора целиком.

Степень автоматизации в новой ядерной энергетической установке ледокола существенно повышена. Обеспечено автоматическое и дистанционное управление ППУ, автоматизированы переходные процессы в нормальных и аварийных режимах. Комплексно решен вопрос взаимосвязи систем управления ППУ, энергомеханической установки и гребных электродвигателей.

Обеспечено дистанционно-автоматизированное управление и контроль электроэнергетической установкой совместно со схемами генерирования и распределения электроэнергии, схемами питания ответственных потребителей, а также управление носовой и кормовой электростанциями с единого пульта управления.

Применена машина централизованного контроля, предназначенная для сбора, обработки и представления информации о работе технических средств, о значениях параметров — с индикацией и выдачей сигналов отклонения параметра за допустимые пределы. Предусмотрено также выборочное измерение параметров, цифропечать и проведение вычислительных операций, в том числе и для формирования сигналов на срабатывание аварийной защиты.

Выход наиболее важных параметров за пределы допустимых значений сопровождается звуковой и световой сигнализацией. Одновременно на мнемосхеме начинают мигать участки, в которых возникло это отклонение, что позволяет очень оперативно выявить неисправность и принять меры по ее устранению. Этому способствуют также логические схемы определения первопричины возникновения аварийной ситуации.

Введение обширного комплекса автоматики и средств информации позволило сократить вахтенную службу и уменьшить затраты труда при эксплуатации. Несение вахтенной службы было облегчено, что очень важно при длительном нахождении в море без захода в порты.

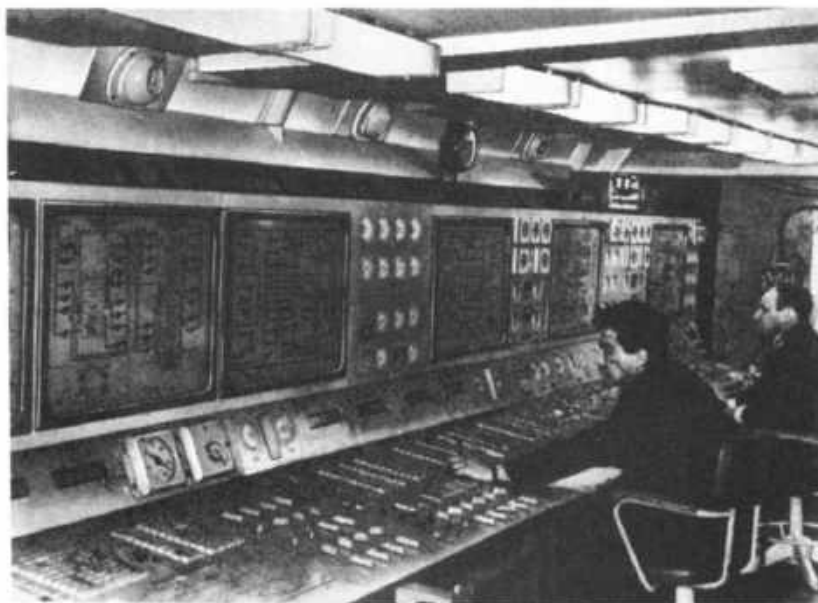


Рис. 2. Пульт управления ядерной энергетической установки атомного ледокола "Ленин".

Автоматизация позволила также улучшить характеристики переходных процессов, в особенности при аварийных режимах, существенно уменьшив последствия аварийных режимов как для судна в целом, так и для работающего оборудования.

В новой установке управлять реактором стало значительно проще, так как теперь реактор обеспечивает работу на основных энергетических уровнях мощности с саморегулированием нейтронной мощности. Задача системы управления сводится к поддержанию с необходимой точностью расхода питательной воды в соответствии с фактическим уровнем мощности реактора.

Система управления и защиты реактора (СУЗ) выполняет функции управления реактором в пусковых и аварийных режимах, защитой реактора, поддержанием основных параметров реактора в нормальных режимах и компенсацией медленных изменений реактивности, связанных с выгоранием, стационарным и нестационарным отравлением, а также зашлаковыванием реакторов. Общий вид пульта управления приведен на рис. 2.

Специфические условия работы ледокола, наряду с редкими и плавными изменениями мощности ГЭУ, требует иногда частых, резких и глубоких ее изменений. В связи с этим предусмотрены два режима управления судовой силовой установкой:

- в тяжелой ледовой обстановке применяется режим "раздельного" управления мощностью ППУ и ГЭУ, при котором постоянно имеется запас по паропроизводительности ППУ над потреблением пара для обеспечения всех маневров ГЭУ (этот режим исключает частые резкие нагрузки на оборудование ППУ);

— во всех остальных условиях применяется режим взаимосвязанного управления мощностью ППУ и ГЭУ без травления пара на главный конденсатор, при котором мощность ППУ отслеживает мощность ГЭУ.

Оба режима позволяют наиболее экономично эксплуатировать ЯЭУ без дополнительных перегрузок основного оборудования ППУ.

Радиационный контроль на атомном ледоколе "Ленин" осуществляется с помощью комплексной автоматической системы. Часть датчиков этой системы выполняет роль дозиметрических приборов, а часть — роль технологических индикаторов излучения, показания которых носят относительный характер и служат для регистрации характеров протекания технологических процессов и контроля состояния активной зоны. Принципиальные задачи системы радиационного контроля остались прежними; новыми являются схемы, используемые для обработки информации. На пульте вахтенного дозиметриста имеется табло, на которое он может вызвать любые интересующие его данные по радиационной обстановке. Здесь же расположен экран электронно-лучевой трубки, на котором в виде вертикальных световых линий воспроизводится радиационная картина по всем каналам контроля.

Проведенные испытания новой ЯЭУ подтвердили все заложенные в проекте характеристики, показали устойчивую и надежную работу во всех нормальных и аварийных режимах.

Атомный ледокол "Ленин" с новой ППУ плавал в 1970 году в Арктике 161 сутки. За это время ледокол прошел 22 000 миль, из них около 17 440 миль во льдах, и выполнил возложенные на него задачи. В ноябре-декабре месяце атомный ледокол "Ленин" совершил экспериментальный рейс с целью изучения ледовой обстановки в районе Северного морского пути в столь позднее время года.

Модернизированная ЯЭУ в составе ледокола проработала в 1970 году около 5 200 часов. В тяжелых арктических условиях, в ледовой обстановке все оборудование ППУ работало безотказно. Комплексная система автоматического и дистанционного управления и контроля ППУ работала удовлетворительно, обеспечив работу атомной и технической установок.

Проведенные измерения в период навигации показали, что в подавляющем большинстве помещений фактические уровни излучения ниже регламентированных.

В целом новая ППУ обладает высокоманевренными свойствами, надежна в эксплуатации, удобна в обслуживании и имеет более высокие экономические показатели.

УДК 621. 039. 576: 621. 12

Ледокол «Арктика» — новое достижение советского атомного судостроения

МИТЕНКОВ Ф. М., ПОЛОГИХ Б. Г., СЛЕДЗЮК А. К., ХЛОПКИН Н. С.

Созданные в Советском Союзе атомные ледоколы являются удачным опытом в применении судовых ядерных установок. Атомная энергия дает наибольшие преимущества в том случае, когда судно должно находиться в море длительное время, не заходя в порты. Сейчас, когда судовая ядерная энергетика засвидетельствовала свою надежность, вопрос о широком ее применении в морском флоте определяется только экономичностью.

Многолетний опыт эксплуатации атомохода «Ленин» доказал, что строительство ледоколов, особенно с серийной энергетической установкой и общей береговой базой обслуживания, экономически целесообразно. Это тем более верно для более мощных ледоколов, необходимых для продления сроков арктической навигации, повышения скорости проводки судов в тяжелых ледовых условиях. Заметное улучшение ледокольных качеств достигается только при существенном росте мощности ледоколов.

3 июля 1971 г. на Балтийском заводе в г. Ленинграде был заложен новый атомный ледокол «Арктика». Мощность его турбоэлектрической машинной установки составляет 75 тыс. л. с., водоизмещение около 21 тыс. т. 26 декабря 1972 г. ледокол был спущен на воду, а в 1974 г. — окончена его достройка и завершены ходовые испытания. При проектировании и строительстве ледокола учитывались требования Конвенции по охране человеческой жизни на море 1960 г., относящиеся к ядерным судам. Атомоход строился под наблюдением и по правилам Регистра СССР. Эти меры в сочетании с использованием опыта сооружения и эксплуатации ледокола «Ленин» обеспечили высокую надежность и безопасность как на борту «Арктики», так и окружающей среды.

Источником энергии на ледоколе служит паропроизводящая установка. Получаемый в ней пар поступает в две главные турбины,

вращающие генераторы переменного тока. Через выпрямительное устройство ток направляется к трем гребным электродвигателям. Каждый из двух автономных блоков паропроизводящей установки включает в себя реактор с водой под давлением, четыре парогенератора, четыре главных циркуляционных насоса, компенсаторы объема, холодильники, вспомогательные насосы и фильтр. Реакторы атомохода «Арктика» аналогичны реакторам ледокола «Ленин» [1]. Они размещены в отдельных газоплотных помещениях, называемых реакторными отсеками, которые находятся за надежной биологической защитой. Над реакторными отсеками находится аппаратное помещение с оборудованием, не требующим постоянного обслуживания. При необходимости вход в это помещение возможен через герметичные двери.

Первый контур паропроизводящей установки, содержащий радиоактивный теплоноситель, имеет сварное исполнение. Герметичное уплотнение приводов органов регулирования, циркуляционных насосов, системы очистки теплоносителя дало возможность свести к минимуму выход жидких и газообразных радиоактивных продуктов. Некоторое их количество появляется лишь при отборе проб воды первого контура, который производится для контроля качества теплоносителя. Отбираемая вода при этом направляется в герметичные монжюсы, расположенные в биологической защите под реакторами; здесь она хранится до возвращения ледокола из навигации. Необходимости в частом отборе проб первого контура нет, так как водно-химический режим первого контура самоподдерживающийся и не требует вмешательства экипажа в течение навигации. В случае появления аварийных протечек при неисправности оборудования (например, течей в парогенераторах) они быстро детектируются, и неисправное оборудование отсе-

кается двойным запором. По опыту эксплуатации атомохода «Ленин» объем накапливаемых вод первого контура невелик и не превышает 1—2 м³ за навигацию.

Система вентиляции, поддерживающая необходимое разрежение воздуха в потенциально опасных помещениях, работает по разомкнутому циклу с выбросом отсасываемого воздуха через наиболее высокую часть судна — готмачту. Выбрасываемый воздух тщательно контролируется на наличие радиоактивных газов и аэрозолей с помощью системы дозиметрических приборов. В случае утечки радиоактивных веществ из первых контуров и повышения активности воздуха до определенных контролируемых значений система вентиляции переводится в замкнутый цикл работы. При этом весь воздух проходит через фильтры и кондиционеры.

На ледоколе «Арктика» применена тщательно проверенная система радиационного контроля [2]. Она решает широкий круг задач. С помощью спектрометрического датчика, настроенного на реперные изотопы ⁸⁶Kr + ⁸⁶Rb, детектора γ -излучения, а также датчика запаздывающих нейтронов оценивается состояние теплоносителя и целостность оболочек твэлов. Несколько β -датчиков контролируют герметичность различного оборудования, каждого парогенератора и всех парогенераторов вместе, а несколько γ -датчиков — герметичность вспомогательных теплообменников. Установленные на вентиляционных коробах β -датчики контролируют выброс газов и аэрозолей. Сбросные воды контролируются сцинтилляционными спектрометрическими γ -датчиками. С помощью γ - и нейтронных датчиков оценивается радиационная обстановка в ряде помещений центрального отсека. Переносные и местные β -датчики контролируют загрязнения тела и одежды, поверхностные загрязнения помещений. Сведения, получаемые датчиками радиационного контроля, централизованно обрабатываются и выводятся на пульт. Обработка этой информации позволяет прогнозировать радиационную обстановку и своевременно принимать меры по ее нормализации и защите персонала. К этим мерам относятся отключение части энергетического оборудования, перевод вентиляции в замкнутый цикл работы, ввод фильтров очистки, использование индивидуальных защитных средств, сокращение времени пребывания персонала в помещениях с повышенным фоном, проведение дезактивации.

Весь персонал, обслуживающий паропроиз-

водящую установку, имеет индивидуальные дозиметры для контроля внешнего облучения; кроме того, предусмотрена аппаратура для «прижизненного» определения содержания радионуклидов в организме.

Ледокол надежно обеспечен электроэнергией от двух автономных электростанций, размещенных в отдельных отсеках; мощность каждой может удовлетворять все потребности в нормальных и аварийных условиях. Носовая электростанция имеет два, а кормовая — три турбогенератора по 2000 кВт. Кроме того, имеется резервный дизель-генератор, расположенный в отсеке кормовой электростанции. Его мощность достаточна для расхолаживания паропроизводящей установки и обеспечения других нужд судна в случае выхода из строя обеих электростанций. Резервный дизель-генератор автоматически включается в работу в случае отключения любой из электростанций. Предусмотрены также еще два аварийных дизель-генератора, автоматически запускающихся при срабатывании аварийной защиты на любом из реакторов. Аварийные дизель-генераторы могут обеспечить электроэнергией наиболее важные потребители судна, в том числе средства расхолаживания установки при полном обесточивании обеих электростанций.

Энергетическая установка ледокола комплексно автоматизирована. Это позволило сократить обслуживающий персонал, уменьшить затраты на эксплуатацию при одновременном улучшении характеристик установки, особенно в переходных и аварийных режимах. Предусмотрено автоматическое и дистанционное управление паропроизводящей установки, электростанций, электромеханической установки и гребных электродвигателей и обеспечение взаимосвязи этих систем.

Для сбора и обработки информации о работе технических средств на ледоколе установлена ЭВМ централизованного контроля. Наиболее важные параметры реакторной установки, главных и вспомогательных турбогенераторов, гребных электродвигателей, общесудовых систем контролируются непрерывно, а остальные — циклически, с выдачей предупредительной и аварийной световой и звуковой сигнализации. ЭВМ автоматически регистрирует по заданной программе наиболее ответственные параметры и выводит их значения на цифрочекать. Также автоматически регистрируются все параметры, отклонения которых вышли за пределы нормы. Машина осуществляет логику засветки мнимо-

схемы, что позволяет оператору контролировать работу оборудования и прохождение команд. Требования живучести обеспечиваются структурой, предусматривающей формирование и направление информации по двум автономным системам.

В 1974 г. были проведены испытания сначала отдельных видов оборудования на стендах и судне, затем комплексные испытания установки в целом. Комплексные испытания проводились у стенки Балтийского завода в г. Ленинграде. Ходовые испытания были проведены в Балтийском море, ледовые — в Карском.

Во время испытаний параметры, характеризующие состояние оборудования, а также различные режимы работы установки, измерялись штатной системой контроля с регистрацией данных на ЭВМ, а также специальной измерительной аппаратурой — многоканальным магнитографом, который позволял многократно воспроизводить полученные данные сразу же после испытаний и в требуемом масштабе времени и оперативно сопоставлять фактические данные с расчетными. Это давало возможность судить, выходят ли исследуемые параметры за пределы, установленные проектом. Испытания паропроизводящей установки и судна прошли успешно и были завершены в короткий срок.

В ходе всех испытаний были подтверждены проектные характеристики и получены убедительные данные, свидетельствующие об удовлетворительном функционировании оборудования в нормальных условиях и при имитации

аварий. Особенно тщательно было проверено оборудование, обеспечивающее безопасность установки. Испытания подтвердили его высокую надежность. Биологическая защита также отвечает всем требованиям. Паропроизводящая установка обеспечивала требуемую выработку пара с заданными расходом и давлением, была достаточно мобильной при маневрировании мощностью. Были тщательно исследованы различные режимы работы паропроизводящей установки при раздельном от паротурбинной установки и при взаимосвязанном управлении. При взаимосвязанном управлении мощность реактора автоматически следовала за мощностью, потребляемой всеми механизмами ледокола и определяемой расходом питательной воды через парогенераторы для поддержания давления пара в главном паропроводе.

Испытания тоже были завершены успешно и в короткий срок. Министерство Морского флота СССР приняло ледокол в эксплуатацию. Отечественный ледокольный флот пополнился новым атомоходом, наиболее мощным из гражданских судов мира. Ввод его в эксплуатацию расширил возможности нашей страны по освоению северных областей и арктических районов.

Поступила в Редакцию 17/VII 1975 г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Митенков Ф. М. и др. Новая атомная установка ледокола «Ленин». IV Жевевская конференция, 1971, докл. № 722.
2. Жернов В. С. и др. Система радиационного контроля атомных энергетических установок с водяным теплоносителем. IV Жевевская конференция, 1971, докл. № 687.

УДК 629.12:621.029.578

20 лет атомному ледоколу «Ленин»

ЛЕВЕНДОВ О. К., МЕЛАННИКОВ Э. М., МИТЕНКОВ Ф. М., МОШЕВИЧ З. М., ПОЛОГИХ В. Г., ХЛОПКИН Н. С.

20 лет назад была начата опытная эксплуатация первого в мире надводного атомного судна гражданского назначения — ледокола «Ленин». Имя великого Ленина было присвоено самому мощному в то время ледоколу, обладающему наибольшей энергооборуженностью, повышенной ледопроходимостью и небывалой автономностью плавания.

Основные характеристики ледокола следующие: мощность главных машин около 32 000 кВт, водоизмещение — 16 000 т, наибольшая длина — 134 м, ширина — 27,6 м, осадка — 9,2 м, гребных винтов — 3, скорость на чистой воде — 19,7 узлов, во льду толщиной до 2 м — 3 узла.

Проектирование ледокола было начато в 1953 г. под научным руководством академиков И. В. Курчатова и А. П. Александрова. Закладка ледокола состоялась в июле 1956 г. на стапеле Адмиралтейского завода в Ленинграде. 5 декабря 1957 г. ледокол спущен на воду. 12 сентября 1959 г. были завершены комплексные швартовные испытания механизмов, в том числе при работе реакторов на мощности, и ледокол выведен к мосту лейтенанта Шмидта на Неве для проводок на ходовые испытания в Балтийское море. После окончания испытаний 3 декабря 1959 г. ледокол принят в опытную эксплуатацию.

С 1960 г. атомный ледокол участвует в арктических навигациях, обеспечивая проводку судов по Северному морскому пути. С самого начала он направляется для выполнения плановых заданий на наиболее трудных участках трассы. О том, что его эксплуатация пока еще опытная, как-то сразу забыли. Он был одним из основных участников ранней проводки судов на трассе Баренцево море — Енисей, где вскрытие ледовой перемычки в устье Енисея под силу только мощным ледоколам.

В середине навигации ледокол работал в проливе Вилькицкого, который забит тяжелыми льдами даже летом и освобождается от них лишь на короткое время при благоприятных ветрах. Проводка караванов судов через этот пролив без мощных ледоколов опасна, а зачастую и невозможна. Поздней осенью при завершении навигации ледокол выводил из-под льдов не только обычные транспортные суда, но и суда ледового класса, которые, как правило, совершают рейсы самостоятельно.

Уникальные возможности ледокола — большая мощность в сочетании с автономностью плавания 1 год — позволяли ему уверенно работать на любом участке трассы Северного морского пути. Само появление ледокола на трассе вселяло уверенность в благополучном завершении проводимых опера-

ций, что дало возможность значительно увеличить сроки навигации.

Атомный ледокол «Ленин» внес вклад в совершенствование тактики проводки караванов судов во льдах, увеличение скорости ледового плавания. Он положил начало ряду операций в Арктике, которые существенно расширили возможности использования Северного морского пути для нужд народного хозяйства. В 1961 г. он совершил высокоширотное плавание с целью высадки дрейфующей станции Северный полюс-10 и установки на границе паковых льдов дрейфующих автоматических метеорологических станций. Позднее подобные операции выполняли и другие ледоколы («Владивосток», «Сибирь»).

В 1970 г. ледокол осуществил первую зимнюю проводку транспортных судов в устье Енисея для перевозки норильской руды. В настоящее время здесь навигация стала практически круглогодичной.

В 1971 г. атомный ледокол «Ленин» совместно следоколом «Владивосток» совершил высокоширотное плавание из западного сектора Арктики в восточный — в порт Певек. Этот рейс в значительной мере предвосхитил знаменитый рейс «Сибирь» с транспортным судном «Капитан Мышевский».

В 1976 г. ледокол возглавил первую проводку транспортных судов к полуострову Ямал с выгрузкой на припайный лед материалов и оборудования для нефтегазодобывающей промышленности; в настоящее время ежегодный поток грузов сюда достигает десятков тысяч тонн.

И, наконец, в 1977—1978 гг. ледокол «Ленин» непрерывно проработал в Арктике в течение 390 суток, осуществив первое ледокольное круглогодичное плавание. За большие заслуги в развитии перевозки грузов на трассах Северного морского пути ледокол награжден орденом Ленина.

На ледоколе применена атомная турбоэлектрическая энергетическая установка, состоящая из паропроизводящей установки, главных турбогенераторов и электродвигателей постоянного тока. Использование электродвижения улучшило маневренность ледокола, что очень важно для форсирования тяжелых льдов, движения в составе каравана и ооколки проводимых судов.

В качестве паропроизводящей установки на ледоколе «Ленин» была использована сначала установка, состоящая из трех автономных реакторных блоков, а затем, после реконструкции, — из двух. Корпусной реактор водо-водяного типа первой установки имел две петли, каждая из кото-

рых включала парогенератор, два главных циркуляционных насоса, аварийный циркуляционный насос и ионообменный фильтр. В случае неисправности оборудования или появления течи в нем петлю можно было полностью отключить сдвоенными задвижками. Подробное описание паропроизводящей установки (ППУ) представлено в докладе [1].

К 1966 г. оборудование ППУ выработало предусмотренный техническими условиями ресурс. Приобретенный опыт указал на целесообразность некоторых модернизационных мероприятий, направленных на снижение эксплуатационных расходов. Поэтому во время капитального ремонта было решено заменить паропроизводящую установку на усовершенствованную, разработанную к этому времени для новых, еще более мощных ледоколов типа «Арктика», создание которых планировалось в ближайшие годы. Замена была осуществлена в 1969 г.

100-летие со дня рождения В. И. Ленина было ознаменовано физическим, а затем и энергетическим пуском реакторов новой ППУ. В конце июня 1970 г. ледокол «Ленин» вновь стал проводить суда по ледовым трассам Арктики.

В новой реакторной установке использованы также корпусные реакторы водо-водяного типа. Число реакторов сокращено с трех до двух, так как надежность их оказалась выше первоначально ожидаемой. Два реактора вполне обеспечивают ледоколу выход из льдов и возвращение на базу при отказе какого-либо оборудования. Описание ППУ было дано в работе [2]. В несколько раз увеличен энергозапас активных зон, а их физические параметры и характеристики контура изменены таким образом, чтобы улучшить свойства саморегулирования.

Существенно увеличен ресурс всего оборудования. Был упрощен первый контур за счет сокращения магистралей и устранения арматуры на них. Установка более приспособлена к ремонтам за счет расширения доступности к оборудованию, вертикального исполнения механизмов, сосредоточения основных съемных частей в аппаратном помещении, обслуживаемом передвижным краном. ППУ комплексно автоматизирована, и личный состав освобожден от постоянных вахт в ее помещениях. Благодаря всему этому экипаж был уменьшен на 30%, стоимость 1 МВт·ч снизилась в два раза, а объем ремонтных работ — в четыре раза.

Атомные реакторы на ледоколе прошли всестороннюю проверку. Условия ее отличались экстремальностью для энергетической установки вообще, а для атомной тем более. Это — маневренная работа при качке, вибрации, ударах об лед и сложности подачи в ледовых условиях достаточного количества охлаждающей забортной воды для паротур-

бинт. Опыт эксплуатации реакторов на ледоколе «Ленин» дал ценный материал для совершенствования атомных судовых установок. Идея использования корпусного водо-водяного реактора на атомных судах оказалась очень удачной. Такой реактор прост в управлении, стабильно поддерживает требуемый уровень мощности. Он является надежным источником энергии. Предусмотренное при появлении неисправностей резервирование оборудования в ряде случаев оказалось избыточным.

При разработке реакторов успешно решена задача создания активных зон с энергозапасами, обеспечивающими работу ледокола без перезарядки в течение трех — четырех лет. Основные тепловыделительные характеристики активных зон и органов регулирования были подтверждены в процессе эксплуатации. Положительный опыт применения выгорающих поглотителей для компенсации избыточной реактивности с целью удлинения кампании и выравнивания энерговыделения позднее нашел применение и в стационарных и в судовых установках. Поля энерговыделения сохраняли свою устойчивость в течение всей кампании. Двухкислородное топливо в циркониевых и стальных оболочках доказало свою работоспособность вплоть до максимального выгорания топлива 30 000 МВт·сут/т U. Показала перспективность использования циркониевых сплавов для оболочек топливных элементов.

Для ряда эксплуатационных режимов были выявлены значительные теплотехнические запасы. Это дало возможность снизить число сигналов срабатывания аварийной защиты, перевести их в сигналы экстренного снижения мощности до безопасного уровня (в режимах остановки одного или двух циркуляционных насосов первого контура, при остановке турбогенераторов). Очень полезными оказались предупредительные сигналы, сопровождающиеся автоматическим воздействием на систему регулирования. Это сигналы по превышению мощности, температуры, давления. Реализация комплекса мероприятий по совершенствованию схем защиты реакторов привела к тому, что случаи срабатывания аварийной защиты во время плавания стали единичными.

Водо-водяные реакторы, примененные на ледоколе, обладают свойством саморегулирования. Это свойство проявляется в том, что реактор в силу внутренних, главным образом температурных, обратных связей стремится изменить режим и перейти в новое состояние так, чтобы скомпенсировать излишнюю реактивность, вызванную в нем внешними возмущениями.

Реакторы оказались динамически устойчивыми в довольно широком диапазоне изменения отрицательного температурного коэффициента реактивности. Качество переходных процессов при саморегулировании по времени установления процесса

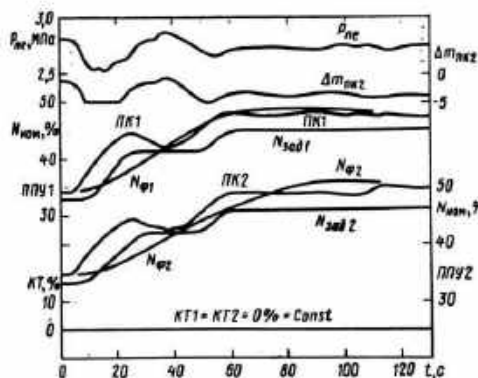


Рис. 1. Изменение параметров ППУ при увеличении нагрузки на гребном электродвигателе в режиме взаимосвязанного управления; $P_{\text{пар}}$ — давление пара; $\Delta m_{\text{ПК}}$ — сигнал коррекции положения ПК; $N_{\text{зад}}$ — заданная мощность ППУ; $N_{\text{ф}}$ — фактическая мощность ППУ; ПК — положение питательного клапана; КТ — положение клапана травления

рительное. Управлять мощностью реактора можно изменением расхода питательной воды. При увеличении ее расхода происходит увеличение теплоотдачи в парогенераторах, что приводит к снижению температуры воды на входе в реактор. В результате высвобождения реактивности при снижении температуры воды увеличивается мощность, а затем и температура воды на выходе, что приводит к компенсации разбаланса реактивности.

Было показано, что может быть подобрана такая взаимосвязь между средней температурой воды в реакторе и мощностью, что реализация ее позволит изменять мощность без изменения положения органов регулирования. Таким образом, свойство саморегулирования позволяет значительно упростить систему регулирования и полностью отказаться от автоматических регуляторов нейтронной мощности.

Свойство саморегулирования упрощает управление ППУ в режиме, когда ее мощность должна следовать за нагрузкой главных двигателей ледокола. Это — режим взаимосвязанного управления энергетической установкой. Непосредственно капитан задает изменение нагрузки двигателей или хода ледокола. Это вызывает изменение расхода пара через главные турбогенераторы и изменение его давления. Последнее дает импульс для изменения расхода воды во втором контуре, что и приводит мощность реактора в соответствие с потребляемой мощностью на винтах.

Взаимосвязанное управление осуществлено на атомных ледоколах «Арктика» и «Сибирь». Оно рекомендовано к применению при движении ледо-

ледоколов во льдах не требуется частое и глубокое маневрирование мощностью реакторов.

На рис. 1 воспроизведена запись с магнитографа, отражающая изменение основных параметров первого и второго контуров ППУ при увеличении мощности с 34 до 48%. Здесь же показано положение клапана травления пара. Как видно, клапан остается все время в закрытом положении, то есть излишки пара в энергетической системе отсутствуют.

Работа с включенной системой взаимосвязанного управления сводит функции оператора, управляющего реактором, в основном к роли наблюдателя, контролирующего протекание процессов по приборам в рамках ожидаемых отклонений. При выходе за их пределы оператор может по согласованию с капитаном судна перевести управление реактором на себя. При этом мощность реактора и гребной установки будет регулироваться раздельно.

Режимы взаимосвязанного управления, различные динамические режимы, очень важные для маневренной установки ледокола, отрабатывались во время комплексных швартовых и ходовых испытаний. Очень большую роль в их отработке сыграло аппаратное оснащение, в особенности реактиметр и магнитограф.

Аналоговый реактиметр на основе точечной модели кинетики позволил существенно сократить время измерений. Знание мгновенного значения реактивности реактора оказалось очень полезным и при определении эффективности органов СУЗ, и при отработке алгоритмов управления в различных нестационарных и аварийных режимах. Измерение реактивности в переходных процессах — хорошее дополнительное средство контроля.

Измерения и регистрацию десятков разнородных сигналов осуществляли с помощью магнитографа, разработанного специально для этих целей. Магнитограф одновременно измерял до 100 параметров с высокой статической и динамической точностью, используя сигналы как штатных, так и штатных датчиков установки, не внося искажений в их работу (мониторинговых камер, термометров, термометров сопротивления, измерителей расхода и перепада давления, сельсинов и др.). Оперативная регистрация и возможность многократного воспроизводства информации в аналоговом или цифровом виде повысили качество эксперимента. Магнитограф имеет приспособления для автоматического ввода в ЭВМ полученных данных для последующей математической обработки.

Подсказанный опытом эксплуатации отказ от разветвленного первого контура с большим количеством запорной арматуры оказался весьма результативным. В новой ППУ нет утечек теплоносителя первого контура, обуславливающих необходимость его подпитки, а следовательно и нару-

нал службы радиационной безопасности проявил большую инициативу во внедрении контроля радиоактивности воды первого контура с помощью датчиков нейтронного и γ -излучений. Это позволило резко сократить частоту отбора контрольных проб воды из первого контура, в результате чего уменьшилась частота пополнения его водой.

Технология поддержания заданного водного режима в настоящее время хорошо отработана. Обеспечивающие режим ионообменные фильтры первого контура работают на одной загрузке ионитами всю навигацию. Это позволяет перезаряжать иониты, как правило, в базовых условиях. Перезарядка осуществляется только гидравлическим путем при сниженном давлении в первом контуре.

Важными условиями обеспечения надежной и безопасной эксплуатации являются систематические осмотры, освидетельствования и испытания оборудования ППУ, проверки физических и теплотехнических характеристик реактора, функциональные проверки системы защиты и алгоритмов управления. Перед каждым выходом на мощность после межнавигационного ремонта производятся функциональные проверки систем защиты и алгоритмов управления в нормальных и аварийных режимах. Эти проверки обычно производятся с привлечением базовых специалистов и осуществляются в соответствии с разработанными программами под наблюдением главного физика ледокола. Их цель — убедиться, что контролируемые характеристики не вышли за пределы допустимых значений в соответствии с предписанными эксплуатационной документацией, что приборы имеют необходимую точность, а органы регулирования — требуемую эффективность и правильно выставленные концевые выключатели. Внимательно проверяется паровая и водяная арматура парогенераторов на плотность заклипирования и в соединениях. Производится визуальный осмотр труб и их креплений, сварных швов, защитных покрытий. Проверки завершаются контрольным выводом установки на спецификационный уровень мощности, во время которого обследуется все оборудование.

Более тщательное освидетельствование оборудования совмещается с работами по перегрузке топлива, когда имеется возможность произвести осмотры внутренних поверхностей оборудования первого контура. При каждой перегрузке топлива осматриваются конструктивные узлы активной зоны и корпуса реактора в доступных местах, направляющие для перемещения органов регулирования, посадочные места топливных сборок. Для осмотров используются перископы и телевизионная камера.

Во время перезарядки реактора топливом осматривается крышка реактора, подвергаются ревизии детали крепления и герметизация, проводятся гидравлические испытания стоек приводов стержней регулирования и т. д. На специальном стенде



Рис. 2. Вид сверху на атомную установку

проверяются сервоприводы СУЗ, включающие определение вращающих моментов и времени подъема и опускания стержней.

Длительная и напряженная эксплуатация атомного ледокола «Ленин» подтвердила высокую надежность оборудования паропроводящей установки и всей установки в целом. Выявленные в процессе работы отдельные недостатки в оборудовании не ограничивали эксплуатационные возможности ледокола. В целом неисправностей было обнаружено немного, и они устранимы. Компоновка оборудования первого контура новой ППУ ледокола такова, что она обеспечивает легкий доступ к оборудованию для его осмотра, профилактического ремонта и замены (рис. 2).

Подводя итоги двадцатилетней эксплуатации атомного ледокола «Ленин», следует отметить, что одним из важных результатов этой эксплуатации является подготовка высококвалифицированных кадров для гражданского атомного флота. Экипажи новых атомных ледоколов «Арктика» и «Сибирь», состав групп технического надзора за строительством атомных ледоколов и большая часть состава береговых служб обеспечения ледоколов сформированы из моряков ледокола «Ленин». Все они проявили высокую творческую активность в освоении новой техники.

Атомные ледоколы «Ленин», «Арктика» и «Сибирь» своими достижениями в развитии арктического мореплавания и высокоширотными походами с выходом на Северный полюс и проводкой транспортного судна «Капитан Мышевский» с Запада на Восток внесли крупный вклад в развитие экономических районов Крайнего Севера.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Африкантов И. И. и др. III Женевск. конф., 1964, докл. СССР, № 313.
2. Мытешнов Ф. М. и др. IV Женевск. конф., 1971, докл. СССР, № 122.

**Николай Сидорович
Хлопкин**

Ответственный за выпуск *Б.Г. Пологих*

Редактор *С.А. Руцкая*

Технический редактор *Н.И. Мазеева*

Корректор *В.П. Горячева*

Подписано в печать Т-18989 от 22.09.83 г. Формат 70х108/16.
Офсетная печать. Уч.-изд.л. 5,6. Усл.-печ.л. 6. Тираж 300. Заказ 1234

Отпечатано в Институте атомной энергии им. И.В. Курчатова
123182. Москва, пл. Академика Курчатова