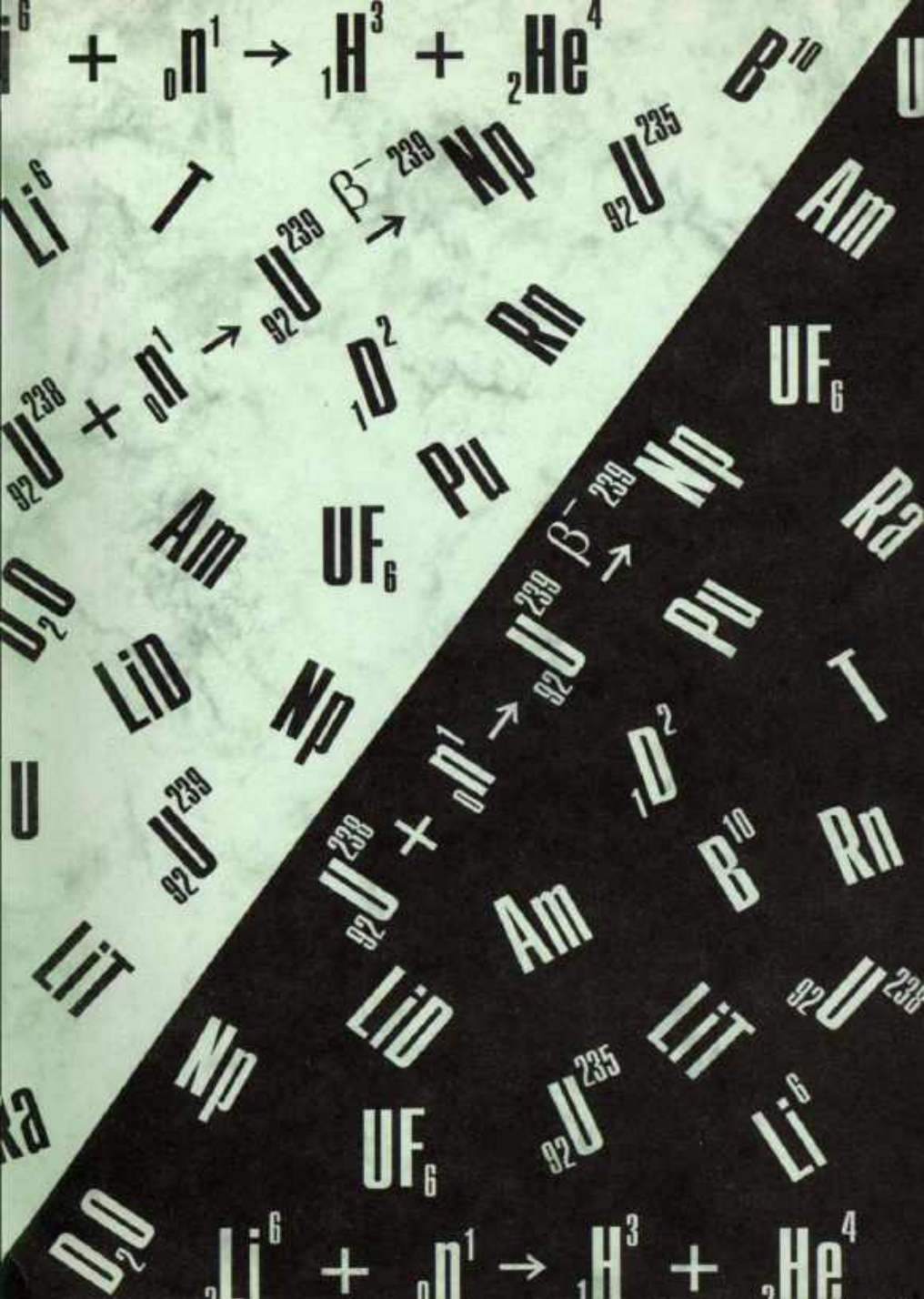


Аркадий КРУГЛОВ

КАК создавалась атомная промышленность в СССР



**КАК
создавалась
атомная
промышленность
в СССР**



50 лет Минатому России



А.К. КРУГЛОВ

**КАК
создавалась
атомная
промышленность
в СССР**

Москва
1995
ЦНИИАТОМИНФОРМ

ББК 31.4
К84

Круглов А.К.

К84 Как создавалась атомная промышленность в СССР. —
2-е изд., испр. — М.: ЦНИИАтоминформ, 1995. 380 с.

ISBN 5-85 165-011-7

В книге освещена деятельность предприятий, НИИ и КБ, участвовавших в разработке и изготовлении изделий и материалов, оборудования и приборов, необходимых для различных направлений атомной науки и техники, и в первую очередь — для создания ядерного оружия. Впервые на страницах печати названы имена многих первопроходцев отрасли. Освещена роль научных руководителей урановой проблемы, государственных деятелей, координировавших работу атомной промышленности в огромной стране.

Автор книги более 40 лет проработал в отрасли: в 50–60-х гг. — на уральских атомных объектах, а затем — в Минсредмаше СССР, где в течение 20 лет руководил Научно-техническим управлением. — 2-е изд., испр.

Книга предназначена для широкого круга читателей.

К $\frac{5002000000}{19Л(03)-95}$ Без объявл.

ББК 31.4

ISBN 5-85 165-011-7

© А.К. Круглов, автор, 1995

© Центральный научно-исследовательский институт управления, экономики и информации
Минатома России (ЦНИИАтоминформ), 1995

ВВЕДЕНИЕ

В начале 1996 г. исполнится 100 лет открытия радиоактивности, с которой связано возникновение ядерной физики — научной основы атомной промышленности. В работе [1] детально рассмотрены основные открытия, которые сделали А. Беккерель, П. и М. Кюри, Дж. Томсон, Э. Резерфорд и их последователи.

9 марта 1896 г. появилась первая статья А. Беккереля о некоторых свойствах невидимых излучений урановых солей. В конце 1897 г. вновь открытыми урановыми, или «беккерелевыми», лучами заинтересовалась М. Склодовская-Кюри. После того как ею было определено испускание ураном и торием «беккерелевых» лучей, она писала: «Я назвала радиоактивностью способность испускать такие лучи и создала новый термин, принятый с тех пор в науке». Излучающие элементы были названы радиоэлементами от слова *radius* — луч. Если годом открытия А. Беккерелем радиоактивности в науке считается 1896 г., то 1898 г. называют годом рождения понятия «радиоактивность»*, введенного М. Кюри. Изучая излучение известных тогда соединений урана и тория, в 1898 г. супруги Кюри открыли два новых элемента: 18 июля 1898 г. ими сделано сообщение об открытии нового элемента полония, а 26 декабря был открыт радий. В 1899 г. М. Кюри отклоняет уподобление «беккерелевых» лучей лучам Рентгена, открытым в 1895 г. Она подчеркивает, что радиоактивность сопровождается потерей массы исходного вещества и энергия радиоактивных веществ постоянно убывает.

М. Кюри — единственная из всех ученых мира — дважды была удостоена Нобелевской премии: в 1903 г. премия была присуждена М. Склодовской-Кюри, П. Кюри и А. Беккерелю за исследование радиоактивности и открытие радия, в 1911 г. — М. Склодовской-Кюри за получение радия в металлическом состоянии.

* Иногда термин «радиоактивность» приписывают то А. Беккерелю, то Э. Резерфорду.

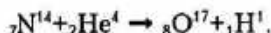


**МАРИЯ
СКЛОДОВСКАЯ-КЮРИ**
(1867–1934) —
директор
Института радия
с 1914 г.

В Институте радия в Париже до революции работал сотрудник Петербургского университета Л.С. Коловрат-Червинский (1909–1913 гг.), а в советское время — З.В. Ершова (1937 г.) и др.

Придавая исключительное значение работам по изучению радиоактивности, автор Периодического закона элементов Д.И. Менделеев в 1902 г. посетил лабораторию супругов Кюри. Тогда же он писал: «Убеденный в том, что исследование урана, начиная с природных источников, поведет еще ко многим новым открытиям, я смело рекомендую тем, кто ищет предметов для новых исследований, особенно тщательно заняться урановыми соединениями». По мысли Д.И. Менделеева, это поможет более детально выяснить причины периодичности элементов, что и было сделано в более поздних работах английских и русских ученых [2–4].

Теория радиоактивных превращений была создана физиком Э. Резерфордом и радиохимиком Ф. Содди в 1902–1903 гг. [2]. С именем английского ученого Э. Резерфорда связано открытие атомного ядра, и его по праву называют основоположником ядерной физики. В 1899 г. он открыл α - и β -лучи, а в 1903 г. предсказал существование трансурановых элементов. За исследования по превращению элементов и химии радиоактивных веществ в 1908 г. ему была присуждена Нобелевская премия по химии. В 1911 г. он установил наличие в атоме ядра диаметром примерно 10^{-12} см, имеющего положительный заряд. В 1919 г. Э. Резерфорд осуществил первую искусственную ядерную реакцию, превратив азот в кислород:



Он открыл элементарную частицу протон, а в 1920 г. предсказал существование нейтрона и дейтрона. Этим не ограничи-

ваются открытия, сделанные отцом ядерной физики. Э. Резерфорд является единственным ученым, который был членом всех академий мира, в том числе с 1925 г. — членом АН СССР [5].

Ф. Содди кроме совместных открытий с Э. Резерфордом радиоактивного распада (1902 г.) и радиоактивных превращений (1903 г.) ввел понятие периода полураспада $T_{1/2}$ и сформулировал в 1911 г. правило радиоактивного смещения в Периодической системе элементов: при α -распаде (два места влево) и β -распаде (одно место вправо). В 1921 г. Ф. Содди была присуждена Нобелевская премия.

Среди первых русских ученых, специализировавшихся в лабораториях Э. Резерфорда, в 1910–1912 гг. были В.А. Бородинский (доцент Петербургского университета) и Ю.Н. Антонов (научный сотрудник химической лаборатории Петербургской академии наук). В советское время у Э. Резерфорда с 1921 г. работал П.Л. Капица. За 13 лет П.Л. Капица стал не только самым выдающимся учеником Э. Резерфорда, но и крупнейшим в мире ученым по созданию сверхсильных магнитных полей. По ходатайству Э. Резерфорда в 1933 г. была создана на средства Мондовского фонда новая физическая лаборатория Лондонского королевского общества и ее руководителем был назначен П.Л. Капица*. В 1929 г. П.Л. Капица был избран членом Лондонского королевского общества. В дальнейшем у Э. Резерфорда с 1928 по 1930 г. работал К.Д. Синельни-

* С 1934 г. П.Л. Капица работал в СССР. С согласия Э. Резерфорда в 1935 г. уникальное оборудование Монд-лаборатории за 30 тыс. ф. ст. было продано СССР для организации работ по сверхсильным магнитным полям и сверхнизким температурам. С 1935 по 1946 г. П.Л. Капица работал директором организованного им Института физических проблем (ИФП).



ЭРНСТ
РЕЗЕРФОРД
(1871–1937) —
директор
Кавендишской
лаборатории с 1919 г.

ков. На стажировке в Кавендишской лаборатории находились А.И. Лейпунский и Ю.Б. Харитон, ставшие впоследствии академиками, руководителями ведущих ядерных центров страны.

Сразу же после открытия радиоактивности крупнейшие русские ученые Н.Н. Бекетов, А.М. Бутлеров, Н.А. Морозов, Н.А. Умов и другие высказали гипотезы о сложности атомов и возможности их деления [4]. Выдающийся физик-теоретик Н.А. Умов в 1905 г. писал: «Нам предстоит новая громадная задача: физика и химия атома — микрофизика и микрохимия... Жизнь внутреннего мира атома открывает нам свойства и законы, может быть, отличные от тех, которые составляют содержание старой, уже древней физики».

Высокая оценка открытия радиоактивности Петербургской академией наук подтверждается избранием М. Кюри членом-корреспондентом нашей академии 7 ноября 1907 г. Во Франции же ее избрали членом Французской академии через 15 лет — 7 февраля 1922 г.

Вклад академика Н.Н. Бекетова в объяснение природы и истории открытия радиоактивности так оценивает крупнейший историк науки, химик и философ академик Б.М. Кедров: «Для истории открытия радиоактивности важно, что впервые А. Беккерель эмпирически наблюдал радиоактивное излучение, что супруги М. и П. Кюри экспериментально открыли новый элемент — радий и что Резерфорд, Содди и Бекетов впервые раскрыли сущность этого дотоле непонятного и загадочного явления». Старейший физикохимик дореволюционной России академик Н.Н. Бекетов был в авангарде современной науки. Он тогда указывал: «С первого раза свойства радия заставили усомниться в установившихся научных убеждениях о неизменяемости и неразлагаемости элементов и принципе сохранения энергии, так как радий постоянно выделяет из себя и энергию, и вещественную эманацию... Достаточно было появления радия с его самопроизвольным выделением энергии и эманации, как нас как бы хотят вернуть назад, опять к смешению энергии с веществом». В работе «Попытка объяснения свойств радия» Н.Н. Бекетов утверждал, что распад радия на эманацию (радон) и гелий с выделением большого количества энергии вполне закономерен и происходит в соответствии с законом сохранения энергии, так как «частички, входящие в построения радия и обладающие, как я уже выше доказывал, большим запасом живой силы, могли образовывать вещества с наименьшим запасом энергии, почему при этом и выделяется большой избыток энергии. Итак, образование благородных газов и выделение энергии не только не противоречат друг другу, но и взаимно согласуются между собой» [4]. Глубокое понимание природы радиоактивности позволило Н.Н. Бекетову еще за 10 лет до получения Э. Резерфордом первого искусственного превращения ядра азота в кислород сделать в 1909 г. заключение о возможности искусственного превра-

щения атомов с помощью соответствующих установок. Им отмечалось, что «искусственное превращение элементов при воздействии на них извне возможно двумя путями — через их диссоциацию и синтез», то есть либо полное уничтожение элемента, либо переход элемента с меньшей энергией в элемент с большей энергией.

В течение 5 лет находился во Франции ученик О.Д. Хвольсона Л.С. Коловрат-Червинский, из них 3 года — за счет стипендии имени супругов Кюри, присужденной Парижским университетом. После возвращения в Россию он стал работать в лаборатории при Минералогическом музее Академии наук, который в разное время возглавляли академики Ф.Н. Чернышев, В.И. Вернадский и А.Е. Ферсман. Л.С. Коловрат-Червинским были изучены процессы выделения радона из различных солей радия в зависимости от температуры, исследованы его β -излучение, электропроводность и другие свойства. В начальный период исследования радиоактивности (1898–1913 гг.) учеными было открыто около 30 естественных радиоактивных изотопов, изучены их взаимные превращения, а также свойства их излучения. В период с 1910 по 1913 г. трижды издавались таблицы констант всех радиоактивных веществ, которые были составлены Л.С. Коловрат-Червинским. В них включались периоды полураспада, характер излучения, величины пробега α -частиц, коэффициенты поглощения β - и γ -лучей. Этими таблицами широко пользовались ученые многих стран. В 1919 г. на Международном конгрессе по радиологии и электричеству был дан общий обзор его работ. Таблицы были помещены в сборнике трудов конгресса, а также в монографии М. Кюри (по радиоактивности) и книге Э. Резерфорда «Радиоактивные вещества и их излучение». Впоследствии Л.С. Коловрат-Червинский руководил радиевым отделением Государственного рентгенологического и радиологического института, образованного в нашей стране в 1918 г.

В дореволюционной России работы по изучению радиоактивности и связанных с ней процессов выделения внутренней энергии целенаправленно начали проводиться под руководством академика В.И. Вернадского. В 1908 г. на Дублинском съезде Британской ассоциации наук он детально ознакомился не только с работами французских ученых и Э. Резерфорда, но и с трудами минералогов о геологическом значении открытия радиоактивности. Через 2 года при Петербургской академии наук создается специальная Радиевая комиссия. В ее составе — крупнейшие ученые: В.И. Вернадский, А.П. Карпинский, Ф.Н. Чернышев, Н.Н. Бекетов, Б.Б. Голицин, П.И. Вальден. Уже в 1911 г. были организованы первые радиевые экспедиции в Закавказье, Забайкалье, Фергану и на Урал.

В лаборатории Минералогического музея кроме В.И. Вернадского работали А.Е. Ферсман, К.А. Ненадкевич, Л.С. Коловрат-Червин-



**ВЛАДИМИР
ИВАНОВИЧ
ВЕРНАДСКИЙ**
(1863–1945) –
академик,
директор
Радиового
института
АН СССР с 1922 г.

ский, Б.А. Линдер, В.Г. Хлопин, Б.Г. Карпов и другие основоположники изучения радиоактивности, а также получения радия и использования урана в различных целях.

В монографии [1] приводятся интересные материалы о посещении в 1914 г. перед самой войной М. Кюри г. Красноярска и района Восточной Сибири около Кругобайкальской железной дороги. Образцы урановых минералов из этих районов сибирские краеведы и естествоиспытатели (из учителей и ссыльных) посылали своей соотечественнице М.Кюри в Париж (она родилась в Варшаве). В поисках драгоценного радия, с помощью которого лечили рак и саркому, принимали участие даже крестьяне Минусинского уезда Енисейской губернии. Как отмечает председатель Казанско-Богородской трудовой горно-поисковой артели И.Г. Прохоров (Минусинский уезд), лично слушавший лекцию М. Кюри в г. Красноярске, ее приезд был связан исключительно с научным интересом, который у нас вызвали присылаемые ей образцы урановых минералов.

До 1918 г. развитие радиевого дела в России группировалось вокруг минералогической и радиологической лабораторий Академии наук, работа которых осуществлялась под руководством крупнейшего ученого XX столетия академика В.И. Вернадского. Несколько позднее он отмечал: «Недалеко время, когда человек получит в свои руки атомную энергию, такой источник силы, который даст ему возможность строить свою жизнь, как он захочет. Это может случиться через столетия. Но ясно, что это должно быть. Сумеет ли человек воспользоваться этой силой, направить ее на добро, а не на самоуничтожение? Дорос ли он до умения использовать силу, которую неизбежно должна дать ему наука?...» Эти слова великого

русского ученого во многом оказались пророческими. Во второй половине XX в. в мире были созданы и ядерное оружие, и атомная промышленность, и ядерная энергетика.

Радиоактивные источники давно используются во многих жизненно важных сферах человеческой деятельности, в частности в медицине. Прошло всего полвека с начала освоения атомной энергии, а в мире уже около 17% электроэнергии производится на АЭС. Однако, получив в свои руки атомную энергию и ее громадные возможности, человек только учится должным образом ею управлять, безопасно для окружающей среды и своего здоровья обращаться с ядерным горючим и радиоактивными отходами. Только высокоразвитые в промышленном и научном отношении государства смогли участвовать в освоении атомной энергии. Среди них — бывший СССР. Было не только создано одно из самых совершенных ядерных вооружений, но и развиты атомная промышленность, реакторостроительная база для ядерной энергетике. Наша страна имеет опыт в строительстве и эксплуатации полного комплекса предприятий ядерного топливного цикла. Отечественный потенциал для развития атомной промышленности может сравниться только с потенциалом США. Атмосфера секретности, в которой проводились работы по атомному проекту в СССР, привела к тому, что в настоящее время об этой гигантской работе по освоению атомной энергии, во многом трагической, мало известно общественности. Воспоминания участников работ по созданию ядерного оружия и тех, кто был у истоков создания атомной промышленности, сейчас особенно интересны. Опыт прошлого позволит более объективно, не драматизируя, осознать и степень опасности, и огромные возможности использования атомной энергии, и ее роль в нашей жизни.

В 1992 г. в Минатоме России было принято решение о подготовке к публикации в открытой печати подробной истории атомной промышленности бывшего СССР и Российской Федерации — истории, которая до недавнего времени была одной из самых секретных. Секретность — одна из причин появления большого числа публикаций неспециалистов, распространения тенденциозной информации о проблемах, связанных с использованием атомной энергии. Анализ прессы, проведенный президентом Ленинградского союза специалистов по безопасной деятельности человека профессором О.Н. Русаком, показал, что на Украине за вторую половину 1991 г. из более тысячи публикаций по последствиям аварии на Чернобыльской АЭС только 30 статей подготовлены специалистами и написаны со знанием дела. Такое же положение в местной прессе многих регионов России. За 50-летний период интенсивных работ по созданию в стране атомной промышленности для военных и мирных программ разработчики и производственники были участниками и трагических событий, и ядер-

ных катастроф. Из-за излишней секретности ученые и специалисты, а также общественность не имеют объективной информации, особенно о вредном воздействии на природу и здоровье человека различных производств атомной промышленности. Следует, однако, отметить, что роль отрасли в установлении норм по радиационной защите персонала, природы, населения также мало известна общественности. Немного сведений и о вкладе в решение атомной проблемы отдельных специалистов и коллективов научных институтов и предприятий различных ведомств. В последние годы появляется все больше публикаций, посвященных отдельным сторонам этой гигантской работы. Издание истории атомной промышленности поможет объективно оценить целесообразность проведения работ по отдельным направлениям и своевременность создания новых научных направлений. Прояснится вклад атомных предприятий в экономическое развитие страны. Становление атомной промышленности сопровождалось формированием целых коллективов строителей и производственников, созданием научно-исследовательских и проектно-конструкторских институтов, возникновением новых отраслей промышленности. На 90-е гг. приходится ряд юбилейных дат истории атомной промышленности:

70 лет со дня организации В.И. Вернадским Радиевого института;

60 лет с начала современной ядерной физики, исчисляемого с момента открытия нейтрона Чедвиком (Великобритания) 17 февраля 1932 г.;

60 лет предложенной советским физиком Д.Д. Иваненко независимо от В.К. Гейзенберга (Германия) гипотезы о протон-нейтронном, безэлектронном составе атомных ядер и признания протонов и нейтронов элементарными частицами (август 1932 г.);

50 лет решения Государственного комитета обороны СССР (ГКО) о необходимости возобновления прерванных войной научных работ по исследованию энергии, выделяемой при делении ядер урана (конец 1942 г.);

50 лет с момента назначения И.В. Курчатова (10 марта 1943 г.) руководителем работ по использованию атомной энергии и организации лаборатории № 2 при АН СССР;

50 лет работы ведущих институтов отрасли – НИИ-9 (Всесоюзный научно-исследовательский институт неорганических материалов – ВНИИНМ), Теплотехнической лаборатории (ТТЛ, впоследствии Институт теоретической и экспериментальной физики – ИТЭФ), Научно-исследовательского института электрофизической аппаратуры им. Д.В. Ефремова (НИИЭФА), а также двух конструкторских организаций в Санкт-Петербурге и Нижнем Новгороде.

20 и 30 августа 1995 г. — 50 лет со дня организации Специального комитета и Первого главного управления (ПГУ) при Совнаркоме СССР для решения задач по разработке ядерного оружия и созданию атомной промышленности. Эти органы были наделены полномочиями привлекать к работам любые отрасли промышленности и институты и обеспечивали координацию и контроль за всеми проводившимися в стране научно-техническими разработками по атомной проблеме. Четкая организация работ, мобилизация всех необходимых ресурсов страны позволили уже в декабре 1946 г. в лаборатории № 2 построить первый исследовательский реактор Ф-1 и осуществить на нем управляемую цепную ядерную реакцию. К июлю 1948 г. был спроектирован, построен и введен в действие в Челябинске-40 (сначала — база 10, затем — комбинат № 817, Комбинат им. Д.И. Менделеева, а впоследствии — ПО «Маяк») первый промышленный реактор для наработки оружейного плутония. Первый радиохимический завод для извлечения плутония из облученного урана и завод по изготовлению изделий из плутония начали работать через полгода. Уже 22 декабря 1948 г. на радиохимический завод поступила первая партия облученного материала для выделения плутония. Из очищенного плутония по заданию филиала лаборатории № 2 (КБ-11)* были получены необходимые изделия, а затем была изготовлена и 29 августа 1949 г. успешно испытана на Семипалатинском полигоне первая в СССР атомная плутониевая бомба — первая в СССР, но не первая в мире. До нее были Хиросима и Нагасаки. С этого момента стало ясно, что безнаказанно участь этих городов не сможет повториться в мире.

Напряженная работа по получению плутония проводилась в исключительно неблагоприятных условиях. Из-за недостатка знаний о воздействии радиации на здоровье человека и природную среду, несовершенства технологии и оборудования многие рабочие и ученые получали повышенные дозы радиации. Значительная часть их была отнесена к категории профбольных и временно отстранена от работы на основном производстве. Часть специалистов была переведена в «чистые» отрасли промышленности, лишившись при этом должного медицинского наблюдения. Большие территории, прилегающие к ядру ядерных комплексов, были загрязнены радионуклидами.

По ряду причин, о которых будет сказано ниже, в первом ядерном взрывном устройстве использовался искусственно получаемый элемент — плутоний, а не ^{235}U , распространенный в природе. Теоретические обоснования возможности конструирования взрывного устрой-

* Сначала Приволжская контора, затем КБ-11, объект № 550, «Кремлёв», «Москва, Центр 300», Арзамас-75, известный сейчас как Саров, или Арзамас-16, — Всесоюзный научно-исследовательский институт экспериментальной физики — ВНИИЭФ.

ства из ^{235}U были сделаны еще в 1938—1939 гг. Плутоний был открыт только в 1940 г., а его изотоп ^{239}Pu , из которого состоит в основном оружейный плутоний, был получен позже.

Руководители атомной промышленности и ранее предпринимали попытки сделать достоянием гласности работу отдельных коллективов и специалистов. Приоткрыть завесу секретности с атомной программы предлагал М.Г. Первухин еще в 1967 г. Решением ГКО в начале 1943 г. он был назначен ответственным за формирование первых коллективов для работ по использованию внутриатомной энергии в военных целях. М.Г. Первухин не только был вместе с И.В. Курчатовым у истоков создания лаборатории № 2, но и координировал работу других научных и производственных коллективов, привлеченных к решению атомной проблемы. В своей записке от 31 мая 1967 г., направленной в Политбюро ЦК КПСС, он предложил подготовить сборник статей и воспоминаний ветеранов отрасли. Обосновывая это предложение, он писал: «... в сравнительно короткий срок была создана атомная промышленность, атомная и термоядерная бомбы. Многих ученых и инженеров, которые начинали и организовали большое дело, к сожалению, уже нет среди нас (И.В. Курчатова, В.Г. Хлопина, Б.Л. Ванникова, А.П. Завенягина, В.А. Малышева, П.М. Зернова и др.)». Однако, это предложение М.Г. Первухина было сдано в архив [6—8].

В 1984 г. Союз писателей предложил написать книгу о решении атомной проблемы в СССР. Писателю А.А. Логвиненко решением министра Е.П. Славского была предоставлена возможность посещения ведущих научных центров и проведения бесед с ветеранами промышленных предприятий. Предполагались встречи с крупнейшими учеными. К сожалению, книга так и не была написана. А примерно из 40 ученых и специалистов, воспоминания которых должны были лечь в основу сюжета, к настоящему времени в живых осталось менее половины. В последние годы появились воспоминания, обзорные работы по истории отрасли, среди которых можно назвать следующие:

Гончаров В.В. Первые (основные) этапы решения атомной проблемы в СССР. М.: ИАЭ им. И.В. Курчатова, 1990;

Синёв Н.М. Обогащенный уран для ядерного оружия и энергетики. М.: ЦНИИАтоминформ, 1991;

Гладышев М.В. Плутоний для атомной бомбы: Директор Плутониевого завода делится воспоминаниями. Челябинск-40, 1992;

Кудрявцев Г. «Порох» для атомной бомбы // Кировец (С.-Петербург). 1992. 7, 9, 12 окт.;

Докучаев Я.П. Воспоминания об испытании первой плутониевой бомбы в СССР 29 августа 1949 г. в 6.30 утра на полигоне в Семипалатинской области. Ярославль: Ярославский университет, 1992.

Из-за малого тиража ценнейшие материалы этих сборников не доступны широкой общественности. Изданные в 1992–1993 гг. относительно большим тиражом (10–20 тыс. экз.) книги В.С. Губарева «Арзамас-16», В.И. Жучихина «Первая атомная: Записки инженера-исследователя», С.Г. Кочарянца и Н.Н. Горина «Страницы истории ядерного центра «Арзамас-16» и некоторые другие [публикация ИздАт (Москва) и ВНИИЭФ (Арзамас)] освещают начальный период работы филиала лаборатории № 2 — КБ-11 над созданием ядерного оружия. В указанных работах большое внимание уделено воспоминаниям ученых и конструкторов Российского федерального ядерного центра (ВНИИЭФ) и их деловым взаимодействиям в тот период с руководителями Уранового проекта. В книге В.И. Жучихина детально рассмотрены работы по подготовке и испытанию первой атомной бомбы на Семипалатинском полигоне.

В 1993 г. в Бюллетене Центра общественной информации по атомной энергии был опубликован журнальный вариант настоящей книги — «К истории атомной науки и промышленности», в котором описано, кем и в каких условиях были созданы первые предприятия, институты и КБ атомной промышленности. Форпостом нашей промышленности был плутониевый комбинат № 817 на Южном Урале. В его состав входили уран-графитовые и тяжеловодный ядерные реакторы, радиохимический завод для выделения плутония, очищенного от продуктов деления, а также завод по изготовлению основных изделий из делящихся материалов для атомной бомбы. На Среднем Урале были созданы сложнейшие производства по получению другого делящегося материала для атомной бомбы — ^{235}U с обогащением до 90%. В Средней Азии был создан первый комбинат уранодобывающей промышленности, обеспечивающий природным ураном атомные предприятия Южного и Среднего Урала. Однако для получения ^{235}U из природного урана предварительно необходимо было создать производство шестифтористого урана. Для наработки плутония необходимо было обеспечить получение чистейшего металлического урана и изготовление из него урановых блоков, способных надежно работать в ядерных реакторах. Осуществление в лаборатории № 2 под руководством И.В. Курчатова первой в Европе и Азии управляемой цепной ядерной реакции и строительство первых промышленных уран-графитовых и тяжеловодного реакторов в лаборатории № 3 (будущая ТТЛ, а затем ИТЭФ) под руководством А.И. Алиханова было бы невозможно без организации на заводах других отраслей сложнейших производств по получению специального графита, тяжелой воды и других материалов.

В представляемой читателю книге кроме краткого описания усилий ученых, конструкторов и строителей, обеспечивших создание в 1946–1949 гг. первых предприятий атомной промышленности, приведены

лишь основные участники разработок технологических процессов, новых материалов и специального оборудования из институтов АН СССР, отраслевых НИИ и КБ Минцветмета, Минхимпрома, Минтяжмаша и других отраслей промышленности. Значительное внимание уделено составу основного эксплуатационного персонала и структуре некоторых технологических служб на первых атомных предприятиях. Освещена решающая роль Специального комитета и ПГУ в обеспечении выполнения работ по Урановому проекту.

В книге рассмотрены отдельные этапы работ, проведенные в предвоенные годы, во время войны и в конце 40-х гг. Эти периоды очень важны для понимания причин, которые заставили страну включиться в более чем 50-летний период создания ядерного потенциала. Сопоставление направлений исследований атомной проблемы в таких странах, как США и особенно Германия того времени, позволят объективно взглянуть на отечественную атомную промышленность, в основном возникшую для решения оборонных задач.

Автор надеется, что читатель с пониманием отнесется к тому, что из-за отсутствия целого ряда данных и по другим причинам в книге не приведены имена многих разработчиков и обслуживающего эксплуатационного персонала сложнейших объектов атомной техники.



Предвоенный период (1918—1941 гг.)

Научный задел для будущей атомной промышленности был создан еще до Великой Отечественной войны. В то время в лабораториях университетов и во вновь созданных институтах АН СССР в Ленинграде, Москве, Харькове, Одессе, Томске и других городах велись работы по изучению физических и химических аспектов радиоактивности. Еще в 1922 г. академик В.И. Вернадский отмечал, что «в явлениях радиоактивности открываются источники атомной энергии, в миллионы раз превышающие все те источники сил, какие рисовались человеческому воображению». В лабораториях М. Кюри, Э. Резерфорда, Н. Бора и других крупнейших ученых Западной Европы в качестве стажеров работали представители научных центров из СССР. Все крупные открытия и достижения зарубежной и отечественной науки этого периода хорошо освещены в монографиях и научно-популярных изданиях [2–4].

Интересно вспомнить основополагающие исследования и основные этапы организации работ по атомной проблеме как у нас в стране, так и в наиболее развитых в то время зарубежных странах: Германии, Великобритании, Франции и США. Особенно важно отметить состояние работ в Германии по Урановому проекту к середине 1941 г., которые вызвали атомный бум сначала в Великобритании, а затем в США. Работы по развитию ядерной физики в СССР довольно подробно освещены в статье А.П. Александрова в юбилейном сборнике [9]. В рамках действующей тогда гласности отражены вопросы, связанные с созданием атомной техники в более поздний (после 1940 г.) период. В юбилейных монографиях достаточно подробно освещались научные достижения этого периода в Радиевом институте Академии наук (РИАН), Ленинградском и Украинском физико-технических институтах (ЛФТИ и УФТИ) по ядерной физике и другим направлениям [3, 10–12].

1932 г. вошел в историю науки как «чудесный год радиоактивности» [2]. Он был ознаменован открытием нейтрона, позитрона и дейтерия в Лаборатории Резерфорда. Там же 2 мая 1932 г. ученые Кокрофт и Уолтон при помощи ускоренных протонов осуществили впервые в мире расщепление ядер лития, бора и алюминия. В том же году в УФТИ (Харьков)* было осуществлено расщепление ядра лития (К.Д. Синельников, А.И. Лейпунский, А.К. Вальтер, Г.Д. Латышев) [10]. В УФТИ лишь повторили опыт английских ученых по расщеплению ядер лития. Но для этого в Харькове была решена сложная инженерно-техническая задача: был создан источник высокого напряжения, представляющий собой специальную вакуумную трубку, позволяющую сформировать пучок ускоренных частиц.

В телеграмме Сталину, Молотову и Орджоникидзе, опубликованной в «Правде» 22 октября 1932 г., директор УФТИ И.В. Обреимов сообщал: «10 октября научным сотрудникам УФТИ первыми в СССР и вторыми в мире удалось осуществить разрушение ядра лития путем бомбардировки ядрами водорода, ускоренными в разряженной трубке. Достижения института открывают громадные возможности в исследовании строения атомных ядер... УФТИ строит более мощную установку для разрушения ядер других элементов». Стало совершенно очевидным, что для эффективного изучения структуры ядра необходимы источники нейтральных частиц — нейтронов, а также различные источники излучений, не только естественные (радий, радон), но и искусственные — пучки заряженных частиц больших энергий, получаемых на специальных ускорителях.

В 1932 г. на заседании Ученого совета РИАНа под председательством В.И. Вернадского принимается решение о создании в РИАНе циклотрона. Одновременно была начата подготовка текста постановления правительства о его строительстве. В ЛФТИ создается группа по исследованию атомного ядра². В том же 1932 г. сотрудник РИАНа Г.А. Гамов³ опубликовал монографию «Строение атомного ядра и радиоактивность». В стране это была практически первая попытка осмыслить ядерные процессы [3].

* Институт был основан в 1928 г. и принадлежал Наркомтяжмашу (как и ЛФТИ). В начальный период работы над урановым проектом, имел условное название лаборатории № 1. Впоследствии стал Харьковским физико-техническим институтом (ХФТИ).

² Во многих публикациях авторы связывают начало работ по ядерной физике в СССР именно с созданием этой группы. Однако следует помнить, что в РИАНе один из трех отделов еще с 1922 г. занимался изучением радиоактивных превращений. В созданной в ЛФТИ ядерной группе, руководимой А.Ф. Иоффе и И.В. Курчатовым (всего 10 чел.), в качестве консультантов были привлечены ведущие в стране физики-ядерщики из РИАНа Г.А. Гамов и Л.В. Мысовский.

³ Г.А. Гамов — крупнейший физик-теоретик, с 1932 г. — член-корреспондент АН СССР. В 1934 г. эмигрировал в США, работал в лаборатории Н.Бора. Автор туннельного эффекта, объясняющего α -распад, а также работ по квантовой механике и ядерной физике. Совместно с Э.Теллером установил в теории β -распада правило отбора.

В 1935 г. вышла в свет книга И.В. Курчатова «Расщепление атомного ядра» [13], в которой автор на основании теории Г.А. Гамова о строении поля атомного ядра после рассеяния α -частиц, анализирует в основном результаты зарубежных опытов по «расщеплению» ядер α -частицами от меди до урана. В книге много внимания уделено анализу теоретических и экспериментальных работ по взаимодействию нейтронов с ядрами различных элементов. Тогда же в природном уране впервые был обнаружен изотоп с массой 235 (Ф. Демпстер, США), который до сих пор является основным ядерным топливом.

В 1935 г. группа ученых из ЛФТИ и РИАНа: И.В. Курчатов, Б.В. Курчатов, Л.В. Мысовский и Л.И. Русинов — открыли ядерную изомерию радиоактивного ^{80}Br [14]. Этому открытию предшествовали открытия изотопов и изобаров [2].

В 1937 г. сотрудником Института химической физики (ИХФ) Ю.Б. Харитоном была опубликована работа [15], связанная с идеей разделения газов центрифугированием. (Метод центрифугирования был освоен в промышленном масштабе для обогащения ^{235}U в СССР в 60-е гг., в Великобритании, Германии и Нидерландах — в 70-е гг. Технология центрифугирования является в настоящее время наиболее экономичным способом обогащения ^{235}U .)

В 1938–1939 гг. в Германии О. Ганом и Ф. Штрассманом было установлено, что при поглощении нейтрона ядро урана распадается с выделением огромного количества энергии. Ряд ученых, в первую очередь Э. Ферми и Ф. Жолио-Кюри, пришли к выводу, что при делении урана образуются 2–3 быстрых нейтрона, которые при определенных условиях могут вновь поглощаться ядрами урана. Поэтому цепная ядерная реакция может сопровождаться взрывом чудовищной силы. В работах Э. Ферми и других ученых было показано, что вероятность захвата нейтронов ядрами ^{235}U может быть в сотни раз увеличена при взаимодействии ядер не с быстрыми, а с замедленными нейтронами. Замедление нейтронов происходит при столкновении их с атомами легких элементов (водорода, дейтерия, углерода и т. д.). В 1939 г. работы Н.Н. Семенова, Ю.Б. Харитона, Я.Б. Зельдовича обосновали возможность развития цепных (взрывных) ядерных реакций [9]. Однако расчеты, опубликованные в 1940 г. Ю.Б. Харитоном и Я.Б. Зельдовичем, показали, что в природном уране при использовании обычной воды и графита в качестве замедлителя нейтронов самоподдерживающаяся цепная реакция не может быть осуществлена. Для этого нужно иметь уран, обогащенный изотопом ^{235}U [15]. Авторы тогда ошибались, указывая, что ядерную цепную реакцию взрыва можно осуществить лишь при наличии обогащенного урана и замедлителя: «... для осуществления условий цепного взрыва урана необходимо для замедления нейтронов применять

тяжелый водород или, быть может, тяжелую воду, или какое-нибудь тяжелое вещество, имеющее достаточно малое сечение захвата».

Вопросы, сколько и какого урана необходимо для возникновения самоподдерживающейся цепной ядерной реакции, были противоречивы. Надо отметить, что работы наших ученых в этот период иногда лишь уточняли проводимые эксперименты и теоретические расчеты зарубежных исследователей. Как отмечал позднее И. Н. Головин, «... первые, совершенно грубые оценки размеров уранового шара, нагреваемого за счет энергии реакции деления, опубликовал французский физик Ф. Перрен» [14]. По оценкам Перрена (с учетом точности известных тогда сечений взаимодействия нейтронов с ядрами урана), самоподдерживающаяся ядерная реакция произойдет в шаре массой 7,5 т чистой урановой смоляной руды. Однако в опубликованной много ранее (за рубежом) книге Ф. Содди [2] и других зарубежных публикациях масса уранового шара, по расчетам Перрена, приводилась равной 40 т, а его радиус 274 см. Сейчас хорошо известно и экспериментально подтверждено, что в шаре из металлического природного урана при любых его размерах без замедлителя цепная ядерная реакция возникнуть не может.

В то время в нашей стране ведущим институтом в области технологии обращения с ураном, выделения из него радия и производства источников радиоактивного излучения был ленинградский РИАН. Под руководством В. И. Вернадского, а с 1939 г. академика В. Г. Хлопина была создана одна из лучших экспериментальных баз для изучения физики ядра и радиохимии. С начала организации института (1922 г.) изучение свойств радиоактивных материалов, их распространения в земной коре, технология переработки урановых руд, ядерная физика и радиохимия были основными научными направлениями. В предвоенные годы в РИАНе был построен первый в Европе циклотрон, на котором в марте—июне 1937 г. получили интенсивные пучки протонов с энергией 3,2 МэВ.

Разработанная под руководством В. Г. Хлопина технология выделения радия из урановых руд позволила в 30-е гг. обеспечить научные разработки радиоактивными источниками, а после 1932 г. — источниками нейтронов. В статье «Атомная пушка» (1937 г.) [3] отмечалось, что РИАН получил мощнейший в Европе циклотрон (масса 35 т), построенный с помощью ленинградских заводов «Большевик» и «Электросила». Подобные установки меньшей мощности, как утверждает Л. В. Мысовский, в то время были только в США (четыре аппарата) [3]. Кроме физических исследований на циклотроне можно было производить ежедневно граммовые количества искусственных радиоактивных изотопов для замены радия, используемого в медицине для лечения онкологических больных. Дефицит радия в то время был чрезвычайным. Уже с 1 марта 1923 г. решением

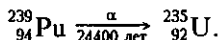
Совета труда и обороны радий был признан материалом Государственного валютного фонда, которым и оставался до конца 70-х гг. К 1937 г. во всем мире было выделено только около 2 кг радия и использовался он в первую очередь медицинскими учреждениями для лечения злокачественных опухолей и других болезней [3]. Радиевую «промышленность», позволяющую из тонн урановой руды выделять миллиграммы радия, в то время представляли РИАН и Березниковский радиевый завод. Ее создателями были В.Г. Хлопин и А.Е. Ферсман, в то время заместитель В.И. Вернадского. Академик А.Л. Яншин в своей работе подробно изложил условия, в которых создавался Радиевый завод [16]: «В июле 1918 г. была утверждена смета расходов Комиссии по естественным производительным силам для исследования радиоактивных минералов на 1918 г. Тогда же были выделены средства отделу химической промышленности ВСНХ для эксплуатации опытного завода по извлечению радия из урановой руды». Завод строился на р.Каме у пристани «Тихие горы» в районе г.Березники. В мае 1920 г. была доставлена урановая руда, которая еще до 1918 г. была добыта в России на руднике Тюя-Муюн в Фергане. Как отмечал А.Л. Яншин, 1 декабря 1921 г. уже были получены первые граммы советского бромистого радия. После этого в РИАНе под руководством В.Г. Хлопина и Л.В. Мысовского была создана установка, на которой выделяли из радия радон для физиков и медиков многих научных и медицинских центров страны.

На циклотроне РИАНа и других установках прошли научную стажировку крупнейшие ученые страны: И.В. Курчатов, А.И. Алиханов, А.П. Виноградов, М.Г. Мещеряков, С.Н. Вернов. Последнее предвоенное открытие -- спонтанное деление ядер урана, сделанное К.А. Петржаком и Г.Н. Флёровым (июнь 1940 г.) -- сотрудниками РИАНа и ЛФТИ под руководством И.В. Курчатова, работавшего с 1935 по 1940 г. по совместительству в РИАНе.

Предвоенный период был ознаменован открытием двух трансурановых элементов, впоследствии названных нептунием и плутонием. Было установлено, что ^{239}Pu может получаться при облучении ^{238}U нейтронами по реакции



^{239}Pu имеет период полураспада 24400 лет и переходит в ^{235}U по реакции



Уже в марте 1941 г. Г. Сиборг получил первые микроскопические количества ^{239}Pu . Было установлено, что плутоний при взаимодействии с нейтронами, так же как и ^{235}U , распадается с выделением примерно 3 нейтронов. Становилось очевидным, что кроме ^{235}U можно получать ядерную взрывчатку на плутонии. Однако в боль-

ших количествах плутоний можно было произвести лишь в ядерном реакторе, для создания которого, в свою очередь, требовалось значительное количество урана.

По инициативе В.И. Вернадского и В.Г. Хлопина 30 июля 1940 г. при президиуме АН СССР была образована Комиссия по проблеме урана, задача которой заключалась в развитии работ по изучению свойств урана и возможности использования его внутриатомной энергии. В комиссию вошли:

- В.Г. Хлопин** — академик, директор РИАНа, председатель;
- В.И. Вернадский** — академик, директор РИАНа до 1939 г.;
- А.Ф. Иоффе** — академик, директор ЛФТИ;
- С.И. Вавилов** — академик, директор Физического института Академии наук (ФИАН), научный руководитель Государственного оптического института;
- А.Е. Ферсман** — академик, РИАН;
- А.П. Виноградов** — профессор, Лаборатория геохимических проблем АН СССР;
- И.В. Курчатов** — профессор, ЛФТИ, РИАН;
- Ю.Б. Харитон** — профессор, ИХФ.

Деятельность комиссии, координировавшей работу многих институтов, практически не освещена. Ее рекомендации и решения играли решающую роль при создании экспериментальной базы в ЛФТИ, УФТИ, других институтах и в целом при проведении работ по цепным ядерным реакциям. Мероприятия, предложенные тогда академиками В.И. Вернадским, А.Е. Ферсманом и В.Г. Хлопиным, были основополагающими для решения урановой проблемы [17]. Среди них:

1. Поручить АН СССР срочно приступить к выработке методов разделения изотопов урана и к конструированию соответствующих установок и войти в правительство с ходатайством о специальных для этого ассигнованиях, а также о выделении соответствующих количеств драгоценных и цветных металлов.

2. Предложить АН СССР осуществить работы по проектированию сверхмощного циклотрона ФИАНа.

3. Создать государственный фонд урана.

К 1941 г. Урановая комиссия выработала программу работ, включавшую:

- выяснение механизма деления урана и тория (РИАН, ЛФТИ, УФТИ);
- выяснение условий поддержания цепной реакции в природной смеси изотопов урана (ИХФ, ЛФТИ);
- разработку методов разделения изотопов урана (РИАН, ЛФТИ, УФТИ и др.).

По механизму деления различных ядер тяжелых элементов и возможности осуществления цепной ядерной реакции И.В. Курчатов в начале 1941 г. опубликовал работу «Деление тяжелых ядер» [18]. На основании известных тогда данных о сечениях взаимодействия ядер с нейтронами и проведенных расчетов он писал: «Хотя принципиально вопрос об осуществлении цепного ядерного распада и решен в положительном смысле, однако на пути практической реализации в исследованных сейчас системах возникают громаднейшие трудности». Это можно видеть из представленной им таблицы о запасах дефицитных материалов в мире и их потребности для осуществления цепной ядерной реакции. В своей публикации И.В. Курчатов отмечал: «Быть может, ближайшие годы принесут нам другие пути решения задачи, но если этого не случится, то только новые, очень эффективные методы разделения изотопов урана или водорода обеспечат существование цепной ядерной реакции».

Таблица 1

Количество материалов, необходимых для осуществления цепной ядерной реакции [18]

Система	Дефицитный материал		
	Название	Необходимое количество, т	Запасы в мире, т
Обогащенный ^{235}U с водой в качестве замедлителя	Уран с повышенным в 2 раза содержанием ^{235}U	0,5	$2 \cdot 10^{-12}$
Природный уран и ^2H	Тяжелая вода	15	0,5
Протактиний	Протактиний	-0,2	$1 \cdot 10^{-6}$

Эти и целый ряд других работ нашли отражение в программе Урановой комиссии АН СССР. Среди прочих были и работы по поиску месторождений урана, пригодных для добычи. Уже 15 октября 1940 г. вышло постановление, предписывающее Академии наук утвердить план работ Урановой комиссии и выделившее ресурсы институтам-исполнителям. Этим же постановлением в составе Урановой комиссии была создана подкомиссия под руководством А.Е. Ферсмана по поиску, разведке и эксплуатации урановых месторождений. Планом исследовательских работ предусматривалось также строительство новых ускорителей и других установок. Уже в феврале 1941 г. на ленинградском заводе «Электросила» начали проводить испытание магнита (75 т) для циклотронной лаборатории ЛФТИ. Комиссия координировала работы по изучению радиоактивных руд, геохимии естественных радиоактивных и радиогенных изотопов. В 1940 г. были выполнены экспериментальные и регио-

нальные исследования радиоактивности вод и горных пород района Кавказских минеральных источников. Ураноносность природных вод, изученная до войны, позволила в будущем выявить закономерности миграции урана и определить перспективные места добычи.

В сентябре 1939 г. в Германии было организовано Урановое общество и разработана программа его деятельности в области использования энергии деления урана. Фактически это первый в мире Урановый проект. Научным центром этого проекта стал Физический институт Общества кайзера Вильгельма, руководимый крупнейшим физиком В. Гейзенбергом. Институт был подчинен Министерству вооружений. О работах в Германии над созданием ядерного оружия стало известно в мае 1940 г. В это время в результате захвата Бельгии в Германию попали 1200 т уранового концентрата, добытого в Конго для выделения из него радия. Это составляло почти половину мирового запаса этого материала. Еще раньше, в марте 1939 г., после захвата Чехословакии, урановая руда, добывавшаяся в Иохимове и поставлявшаяся в другие страны, тоже оказалась в Германии. Тогда же немцами для осуществления цепной ядерной реакции была сделана попытка вывезти тяжелую воду из Норвегии, так как производившийся в то время графит имел много вредных примесей и не был пригоден для изготовления замедлителя в ядерном реакторе [19, 20]. Все это позволяло Германии успешно работать над созданием ядерного реактора для производства плутония и в конечном счете ядерного оружия. Немецкие ученые установили в 1940 г., что ядерной взрывчаткой может быть не ^{238}U , а ^{235}U . Сразу же под руководством П. Гартека начались работы по разделению изотопов урана. Другой немецкий ученый К.-Ф. фон Вайцзеккер в июле 1940 г. теоретически установил, что ^{238}U должен превратиться в ядерном реакторе в новый элемент, который по своим свойствам аналогичен ^{235}U и может использоваться как ядерная взрывчатка. Следовательно, Вайцзеккер самостоятельно открыл элемент, существование которого впоследствии американские ученые экспериментально подтвердили и назвали его плутонием. В декабре 1940 г. под руководством В. Гейзенберга был «построен» первый исследовательский реактор, и к этому времени на одной из немецких фирм было освоено производство металлического урана. Однако в реакторе не удалось получить самоподдерживающуюся цепную ядерную реакцию.

В 1941 г. участники Уранового проекта в Германии убедились, что заложенная в реактор масса урана выделяет нейтронов больше, чем поглощает их. Исследователи были весьма близки к цели: до начала работы реактора было совсем близко. В. Гейзенберг впоследствии вспоминал: «В сентябре 1941 г. мы увидели открывшийся перед нами путь. Он вел нас к атомной бомбе».

Война спровоцировала ускорение работ над созданием ядерного оружия сначала в Великобритании, а затем в США и СССР. В апреле 1940 г. крупнейший ученый Дж. Томсон возглавил правительственный комитет Великобритании по использованию атомной энергии в военных целях. Через год, 15 июля 1941 г., Комитет Томсона представил доклад, в котором говорилось, что до конца войны атомную бомбу создать можно [20]. На основании этого доклада в октябре 1941 г. была утверждена программа работ по созданию ядерного оружия в Великобритании. Эмигрировавшие в США еще до войны крупнейшие ученые (среди них А. Эйнштейн, Л. Сцилард, Э. Ферми) призывали развернуть работы и опередить Германию в создании ядерного оружия. Письмо А. Эйнштейна президенту Рузвельту о необходимости начать работы над новым оружием было послано 11 октября 1939 г. Однако решение о работах над новым оружием было принято в США лишь 6 декабря 1941 г. после доклада Дж. Томсона [19]. Определенную роль в ускорении принятия решения сыграли последствия бомбежки Японией базы США в Пёрл-Харборе. К концу войны в США были сделаны три атомные бомбы. Так зарождалось ядерное противостояние сначала против Германии и Японии, а затем против СССР.



С началом Великой Отечественной войны исследования по использованию энергии деления ядер в СССР практически прекратились. Ведущие институты Ленинграда, Москвы и других городов были эвакуированы, а многие ученые пошли сражаться на фронт.

Уже с начала мировой войны в 1939 г. исследования деления ядер урана были ориентированы не на управляемую цепную реакцию, а на получение взрывного эффекта, то есть на создание нового, ядерного оружия.

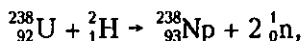
К середине 1942 г. в ГКО стало известно, что в Германии с ее огромным научно-техническим потенциалом при наличии большого запаса природного урана секретно ведутся работы над созданием нового вида мощного оружия — атомной бомбы. В проекте записки наркома внутренних дел Л.П. Берия И.В. Сталину (март 1942 г.) была суммирована полученная из Лондона информация об организации производства урановых бомб в Великобритании. В ней предлагалось проработать вопрос о создании научно-совещательного органа при ГКО для координации всех работ в стране по урановой проблеме и ознакомить видных специалистов с имеющимися в НКВД материалами по урановой проблеме. Среди ученых были названы П.Л. Капица (ИФП), Д.В. Скобельцын (ФИАН) и А.А. Слуцкий (ХФТИ). Об этих и других материалах о вкладе разведки в создание ядерного оружия в феврале 1992 г. на семинаре в Институте атомной энергии им. И.В. Курчатова с участием сотрудников Института истории естествознания Российской академии наук выступил ветеран разведки КГБ А.А. Яцков, который в 40-е гг. был помощником советского резидента в США и участвовал в обеспечении канала связи между Лос-Аламосом (США) и лабораторией № 2*. Кроме того, на необходимость возобновления в СССР работ по

* 26 октября 1994 г. на указанном семинаре выступал другой ветеран разведки В.Б. Барковский, который работал в Великобритании.

урановой проблеме энергично указывал тогда наш молодой ученый, один из авторов сделанного в 1940 г. открытия о спонтанном делении ядер урана лейтенант Г.Н. Флёрв. В Казани, куда были эвакуированы институты АН СССР (РИАН, ЛФТИ, ИХФ и др.), состоялось заседание Малого президиума академии, на котором Г.Н. Флёрв докладывал о возобновлении работ по Урановому проекту. Но крупнейшие ученые-физики А.Ф. Иоффе, П.Л. Капица и другие признали невозможным продолжить эти работы, так как это требовало отвлечения людских и материальных ресурсов. Как писал позднее Г.Н. Флёрв, он не успокоился на этом. Проанализировав доступные ему физические зарубежные журналы, он обнаружил полное прекращение в них публикаций по делению ядер урана и использованию внутриатомной энергии учеными Германии, Великобритании и США, что свидетельствовало о засекречивании исследований в этих странах. Об этом он сообщил в ГКО и И.В. Сталину [21]. По-видимому, это в конечном счете и подтолкнуло к решению о возобновлении работ. В конце 1942 г. ГКО обязал Академию наук начать исследовательские работы по использованию атомной энергии в военных целях и обеспечить их координацию. Решением ГКО от 27 ноября 1942 г. Наркомцветмету было поручено приступить к производству урана из отечественного сырья. Постановлением правительства научным руководителем проблемы после рассмотрения нескольких кандидатур [22] был назначен И.В. Курчатов. Ответственность за обеспечение промышленности и Академии наук необходимыми материалами, приборами и т. д., а также контроль выполнения всех проводимых работ в стране были возложены на заместителя председателя Совнаркома, министра химической промышленности М.Г. Первухина. Как правило, с его разрешения И.В. Курчатов знакомил с материалами разведки и других ученых.

К концу 1942 г. уже было известно, что под действием нейтронов делятся не только ядра ^{235}U , но и ядра изотопов открытого в 1940–1941 гг. нового искусственного элемента плутония, что существенно расширяло фронт исследований.

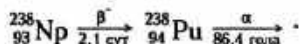
В 1940–1941 гг. работы по открытию элементов 93 и 94 в США были засекречены, и они даже не имели названия. «На протяжении 1941 г. об элементе 94 говорилось как об элементе под названием «медь» и это вполне удовлетворяло исследователей вплоть до тех пор, пока не возникла необходимость применять собственно элемент медь в некоторых опытах. В течение некоторого периода о плутонии говорили как о «меди», а о настоящей меди как о «подлинной меди»... Элемент 94 только в марте 1942 г. назвали плутонием [23]. В конце 1940 г. при бомбардировке урана дейтронами, был открыт элемент 93 — изотоп нептуния $^{238}_{93}\text{Np}$. Процесс его получения проходил по реакции:



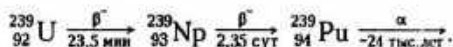
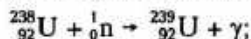


ЭНРИКО
ФЕРМИ
(1901–1954) —
основоположник
ядерной физики

а продуктом его распада был ^{238}Pu :



При бомбардировке $^{238}_{92}\text{U}$ нейтронами весной 1941 г. были открыты более тяжелые изотопы нептуния и плутония:



Позднее стало известно, что примерно через 1,5 года в г. Чикаго (США) под научным руководством крупнейшего ученого XX в. итальянца Э. Ферми 2 декабря 1942 г. в системе природный уран—графит была осуществлена первая в мире управляемая цепная ядерная реакция. Этот выдающийся эксперимент подтвердил возможность получения в больших количествах ^{239}Pu и использования его в ядерном оружии. Об этих достижениях через разведку стало известно И.В. Курчатову, что подтверждается материалами его записок М.Г. Первухину (от 7 и 22 марта 1943 г.). В частности, И.В. Курчатов отмечал:

«...Содержатся отрывочные замечания о возможности использовать в урановом котле не только ^{235}U , но и ^{238}UМожет быть, продукты сгорания ядерного топлива в урановом котле могут быть использованы вместо ^{235}U в качестве материала для бомбы».

15 февраля 1943 г. было оформлено решение ГКО о необходимости создания единого научного центра под руководством И.В. Курчатова, ответственного за создание ядерного оружия. Президиум АН СССР постановлением от 12 апреля 1943 г. придал лаборатории № 2 статус самостоятельной. Сотрудники малочисленных групп, уже работавшие в зданиях других институтов Москвы (Сейсмологический институт, Институт общей и неор-

ганической химии — ИОНХ), зачисленные в лабораторию № 2, в апреле 1944 г. были переведены в специальные здания в Покровском-Стрешневе на окраине Москвы [24]. 14 августа 1943 г. И.В. Курчатов вместе с группой сотрудников был переведен из ЛФТИ в лабораторию № 2. Среди этих сотрудников были А.И. Алиханов, Г.Я. Шепкин, П.Е. Спивак, В.П. Джелепов, Л.М. Неменов, Г.Н. Флёров, М.С. Козодаев [25]. Лабораторию пополнили специалисты, отозванные или демобилизованные из армии. С февраля 1944 г. лаборатории № 2 были приданы права института. С 1949 г. она получила название ЛИПАН (Лаборатория измерительных приборов АН), в будущем — Институт атомной энергии им. И.В. Курчатова, а сейчас — Российский научный центр «Курчатовский институт». Громадной важности задача была поставлена перед И.В. Курчатовым — создать ядерное оружие. Все военные годы коллектив лаборатории № 2 был малочисленным и в основном создавал экспериментальную базу, разрабатывал технические требования к урану и графиту и проводил теоретические расчеты.

Одним из главных подразделений лаборатории № 2, разрабатывавшим уран-графитовый реактор с самоподдерживающейся цепной ядерной реакцией, — сектором № 1 руководил сам И.В. Курчатов. К концу 1945 г. численность работающих увеличилась с 5 (в 1944 г.) до 11 чел. [26]. Среди них:

И.В. Курчатов, начальник сектора № 1 (с 1942 г.);

И.С. Панасюк, заместитель начальника сектора № 1 (с августа 1943 г.);

А.К. Кондратьев, лаборант (с сентября 1943 г.);

Н.Е. Юкович, старший лаборант (с февраля 1944 г.);

Б.Г. Дубовский, научный сотрудник, начальник группы радиотехнических приборов (с сентября 1944 г.).

В конце 1946 г. в секторе № 1 в подготовительных работах, монтаже и пуске первого в стране исследовательского реактора принимали участие уже 74 чел., из них 14 научных сотрудников и инженеров [26]. Таким образом, уже к концу 1945 г. сектор № 1 с соисполнителями создал весь первоочередной научный задел и выдал смежникам технические требования, в первую очередь на необходимое количество и качество урана и графита. Это и позволило за один лишь 1946 г. в лаборатории № 2 построить первый ядерный реактор, физический пуск которого был осуществлен в 18 ч 25 декабря 1946 г. [26, 27]. Строительство реактора, разработка изделий из графита и урана, изготовление оборудования осуществлялись под контролем Специального комитета и ПГУ, организованных в августе 1945 г.

В середине 1943 г. распоряжением заместителя председателя Совнаркома М.Г. Первухина помощником И.В. Курчатова был назначен В.В. Гончаров, до этого работавший директором опытного завода в Баку. В.В. Гончаров прежде всего отвечал за организацию работ по

получению на заводах других отраслей особо чистых графита и металлического урана — основных материалов для активной зоны ядерного реактора. В обзоре [24] достаточно подробно освещены многие проблемы, решение которых привело к созданию атомной промышленности страны. В лаборатории № 2, как отмечает В.В. Гончаров, в 1943—1944 гг. в результате теоретических и экспериментальных исследований были уточнены довоенные расчеты Ю.Б. Харитона и Я.Б. Зельдовича по возможности осуществления цепной реакции. Было установлено, что ^{238}U делится на быстрых нейтронах, замедленные нейтроны он только поглощает*. Это не давало возможности в гомогенной смеси уран—графит осуществить цепную реакцию, так как в присутствии графита быстрые нейтроны замедлялись. Расчетами И.И. Гуревича и И.Я. Померанчука была доказана необходимость создания гетерогенной активной зоны, когда уран и графит природного обогащения в виде блоков расположены с определенным шагом в активной зоне реактора.

К марту 1945 г. технические требования на графитовые блоки (100x100x600 мм) были разработаны. Причем в графите ядерной чистоты среднее содержание примесей золы составляло $3 \cdot 10^{-3} \%$, а содержание бора не должно превышать $2,45 \cdot 10^{-5} \%$.

По заданию лаборатории № 2 в Государственном научно-исследовательском институте редкометаллической промышленности Наркомцветмета (Гиредмет) разрабатывалась технология получения особо чистого металлического урана. В декабре 1944 г. по технологии Гиредмета (Н.П. Сажин с участием З.В. Ершовой) был получен слиток чистого металлического урана массой 1 кг. Тогда же постановлением ГКО от 4 декабря 1944 г. в системе НКВД был создан Институт специальных металлов (впоследствии НИИ-9) с опытным заводом № 5, директором которых постановлением от 3 января 1945 г. был назначен инженер-полковник, профессор В.Б. Шевченко. Институт, как и лаборатория № 2, размещался в недостроенных корпусах Всесоюзного института экспериментальной медицины (ВИЭМ) на окраине Москвы в Покровском-Стрешневе. Только в конце 1945 г. было принято решение об организации производства металлического урана и изделий из него в г. Электростали на заводе № 12 Наркомата боеприпасов. Следовательно, в конце войны практически был создан лишь научный задел по физике реактора Ф-1 и закончены подготовительные работы по обеспечению лаборатории № 2 основными материалами. В других подразделениях лаборатории до 1945 г. работы велись также малыми силами. На 25 апреля 1944 г. в лаборатории на всех научных направлениях работали около 80 чел., из них научных сотрудников — 25. В то же время над проблемой

* Замедляющиеся нейтроны ^{238}U при определенных условиях тоже сильно поглощает (резонансное поглощение).

работали РИАН, ЛФТИ, ИХФ, ИОНХ, а также Гиредмет, завод № 12, Московский электродный завод и ряд промышленных предприятий. До середины 1945 г. исследовательские работы над созданием атомной бомбы и атомной промышленности в целом велись в ограниченном масштабе. Несмотря на интенсивный труд и получение важных результатов, эти малочисленные коллективы не могли обеспечить нужный задел для создания атомной промышленности. Такое положение, по-видимому, объяснялось не только военной обстановкой. В.В. Гончаров отмечает: «По моему мнению, объяснить это можно было следующим. Получив из немецких и американских источников информацию о работах по созданию сверхмощного оружия в Германии и США, в правительстве отпеслись к ней не очень доверчиво. Но все же решили на всякий случай создать организацию, которая занялась бы этим делом. И лишь после взрыва первой американской бомбы в США в июле 1945 г. и сбрасывания двух бомб на Хиросиму и Нагасаки в августе 1945 г. поверили, что оружие действительно создано и это не плод фантазии физиков». Выводы В.В. Гончарова полностью подтверждал Н.М. Синёв, впоследствии главный конструктор Специального конструкторского бюро по разработке технологии и оборудования для получения обогащенного урана для ядерного оружия. В изданном им в 1991 г. обзоре рассматривается история создания в СССР промышленной технологии и производства высокообогащенного урана [28]. Он отмечает, что в мае 1945 г. И.К. Кикоин с сотрудниками небольшой лаборатории перебазировались из Свердловска (Уральский филиал АН СССР) в лабораторию № 2. Только в ноябре 1945 г. под руководством И.К. Кикоина начались исследования различных методов разделения изотопов урана. К широкому развертыванию работ фактически приступили лишь после сообщения о взрыве атомных бомб над Хиросимой и Нагасаки. «Только в сентябре 1945 г., — отмечает Н.М. Синёв, — был рассмотрен вопрос о состоянии научно-исследовательских и практических работ в лаборатории № 2 в области использования внутриатомной энергии. С докладами выступили: 5 сентября — И.В. Курчатов, Г.Н. Флёров, А.И. Алиханов «Об исследованиях по получению плутония в уран-графитовых реакторах («котлах», как тогда назывались ядерные реакторы), охлаждаемых легкой и тяжелой водой»; 6 сентября — И.К. Кикоин, П.Л. Капица «О состоянии исследований по получению обогащенного урана газодиффузионным методом»; 10 сентября — Л.А. Арцимович, А.Ф. Иоффе «Об обогащении урана электромагнитным методом». Следовательно, до окончания Великой Отечественной войны в нашей стране работы велись ограниченными силами и к проведению полномасштабных исследований по созданию ядерного оружия приступили только после взрыва трех атомных бомб из ^{235}U и ^{239}Pu .

Несколько другое толкование началу практических работ в СССР дает академик Ю.Б. Харитон, с 1946 г. являющийся научным руководителем работ по созданию конструкции советского ядерного оружия, а с 1992 г. — почетным научным руководителем Российского федерального ядерного центра (Арзамас-16). Он пишет, что ускорение практических работ в СССР способствовали разведывательные данные, полученные через английского подданного К. Фукса, который с 1941 г. работал сначала в Великобритании, а затем в США над вопросами, связанными с созданием ядерного оружия [29]. Узнав, что работы над ядерным оружием ведутся в секрете от союзника — СССР, К. Фукс считал это недопустимым, и, как отмечает Ю.Б. Харитон, резидентами советской разведки была установлена связь с К. Фуксом и систематическая передача информации в Москву. С 1943 по 1946 г. К. Фуксом и другими агентами нам была передана информация, необходимая при создании ядерного оружия, в том числе по ядерному реактору для наработки плутония, а также подробная схема первого ядерного заряда США. Однако ни разведывательные данные о начале работ по созданию ядерного оружия за рубежом, в том числе и информация К. Фукса, ни инициатива Г.Н. Флёрва, ни письмо академика Н.Н. Семенова в 1940 г. о необходимости развития комплекса работ по созданию ядерного оружия не привели к началу широкомасштабных работ до окончания Великой Отечественной войны. В этой связи уместно еще раз привести слова из доклада Э. Теллера, который был сделан на общеамериканской конференции в 1962 г. по проблемам руководства комплексными программами, в том числе по программе создания атомной и водородной бомб [30]: «У нас было четыре пути, каждый из которых вел к производству расщепляющихся материалов. Производство расщепляющихся материалов — самый трудный момент в создании атомной бомбы. Когда страна достигает этого и успешно его осуществляет, то можно считать, что через несколько месяцев она будет обладать бомбой». В программе по созданию атомной бомбы в США особую трудность представляла необходимость проведения большого объема работ по проектированию, технической разработке и освоению производства расщепляющихся материалов. Выполнить весь необходимый объем работ в военный период могла лишь страна, имеющая мощную экономику и возможность мобилизовать все необходимые материальные и людские ресурсы. Во время войны такой страной могли быть только США. Подтвердить этот вывод можно теми материалами разведки, в которых отмечается, что на создание Атомного центра в шт. Теннесси, где велось строительство завода по производству ^{235}U , было ассигновано 2 млрд. дол. и выделено около 130 тыс. чел. А ведь создавались и другие комплексы.

Какие же это четыре пути получения ядерной взрывчатки, реализация каждого из которых, по словам Э. Теллера, много сложнее, чем конструирование и создание самой атомной бомбы? Эти пути были известны. Уже 17 июля 1942 г., в самом начале практических работ по созданию ядерного оружия в США, президенту в специальном докладе были изложены три метода получения ^{235}U и один метод производства ^{239}Pu [30]: электромагнитное и газодиффузионное разделение изотопов урана, разделение изотопов урана на центрифугах, получение ^{239}Pu с помощью управляемой, самоподдерживающейся цепной ядерной реакции.

Необходимо было установить, каким путем будет легче и дешевле получить ядерную взрывчатку. В докладе Э. Теллера также отмечалось, что несколько килограммов ^{235}U или ^{239}Pu представляют собой взрывчатку, эквивалентную по мощности взрыва нескольким тысячам тонн обычных взрывчатых веществ. Такую бомбу можно изготовить и взорвать в нужный момент. Для получения взрывчатки можно безопасно строить крупные промышленные установки. При наличии ресурсов осуществлять программу необходимо в кратчайшие сроки, чтобы она приобрела военное значение.

Рузвельт отдал приказ немедленно начать работы над атомной бомбой. Весь проект работ был передан в ведение созданного подразделения округа инженерных войск. Все необходимые для работы кадры ученых, помещения, лаборатории, промышленные установки и органы по обеспечению охраны и безопасности были подчинены руководителю проекта — бригадному генералу инженерных войск Л. Гровсу. Проект был официально утвержден 13 августа 1942 г. и назван Манхэттенским. Важнейшие этапы работ по Манхэттенскому проекту:

1. Физический пуск 2 декабря 1942 г. под руководством Э. Ферми первого в мире исследовательского ядерного реактора (построенного под трибунами Чикагского стадиона), на котором была осуществлена управляемая цепная реакция (15 ч 25 мин по чикагскому времени). «Атомному огню» разрешили гореть 28 мин. После этого опыта Э. Ферми стало ясно, что ядерное оружие — реальность. Критическая масса реактора составила 46 т урана, размещенного среди 385 т чистого графита. В графитовых кирпичах были специальные отверстия, где размещались бруски урана. Для управления цепной ядерной реакцией через графитовую кладку реактора проходили несколько каналов с подвижными бронзовыми стержнями, покрытыми кадмием (сильным поглотителем тепловых нейтронов).

2. Строительство и пуск в долине реки Теннесси специального завода и большого количества опытных установок, где из урановой руды получали обогащенный ^{235}U (завод Y-12). Для его обслуживания возник г. Ок-Ридж с населением 79 тыс. Здесь в 1943 г. была создана крупнейшая Клинтонская, а позднее Ок-риджская

национальная лаборатория для отработки электромагнитной и газодиффузионной технологий получения обогащенного ^{235}U , а также для ядерных исследований, изучения трансурановых элементов, переработки отработавшего топлива и др.

3. Строительство в шт. Вашингтон на южном берегу реки Колумбии в пустынной местности г. Ханфорда и крупнейшего комбината для получения плутония (Ханфордский ядерный производственный комплекс). Сразу же после пуска чикагского реактора в Ханфорде начали строить уран-графитовые, охлаждаемые водой реакторы, радиохимические заводы и все прочие установки по производству плутония для ядерного оружия. Л. Гровс в докладе о программе создания атомной бомбы говорил [30]: «В первое время мы не знали, каким окажется плутоний, если удастся его получить при нормальной температуре и давлении, в каком он будет состоянии — твердом, жидком или газообразном... Мы были в исключительной зависимости от теории, и только отдельные практические сведения могли получать, пользуясь средствами микроскопической радиохимии». На базе Ханфордского комплекса впоследствии были созданы Тихоокеанская северо-западная лаборатория и Ханфордская лаборатория инженерно-технических разработок (обе в г. Ричленде).

4. В шт. Нью-Мексико начал создаваться Лос-аламосский научный центр по разработке конструкции атомной бомбы. Манхэттенский проект состоял из нескольких подпроектов, руководили которыми крупнейшие ученые-физики:

- электромагнитное разделение изотопов урана — Э. Лоуренс, руководитель радиационной лаборатории Калифорнийского университета в Беркли;
- газодиффузионное разделение изотопов урана — Г. Юри;
- создание ядерных реакторов в Ханфорде и получение плутония для атомной бомбы — А. Комптон, Э. Ферми, Ю. Вигнер;
- термодиффузионный метод разделения изотопов урана — Эйболсон.

Р. Оппенгеймер возглавлял Лос-аламосскую национальную лабораторию с 1943 г.

Необходимо отметить, что до создания Манхэттенского проекта все лабораторные работы, как и работы на опытных установках, проводились под контролем Управления научных исследований и разработок. И только в середине 1942 г., как пишет Л. Гровс, было решено передать руководство работами и контроль над ними Манхэттенскому инженерному округу [30].

Конечный результат работ по проекту создания ядерного оружия в США известен:

16 июля 1945 г. в 5 ч 30 мин на полигоне в Аламосе была успешно испытана первая атомная бомба из плутония. Мощность взрыва оказалась равной 20 тыс. т тринитротолуола [19];

6 августа 1945 г. в 8 ч 15 мин 30 с над г. Хиросимой в Японии была взорвана вторая атомная бомба, полученная из высокообогащенного ^{235}U ;

9 августа 1945 г. в 11 ч 2 мин над г. Нагасаки в Японии была взорвана третья атомная бомба, где в качестве ядерной взрывчатки использовался плутоний.

Программа по созданию атомной бомбы имела успех, как пишут ученые и политики США, благодаря энтузиазму и упорному труду всех его участников. Им была известна цель, для которой они работали.



Начало создания в СССР ядерного оружия

После капитуляции Германии военные действия продолжались бывшей союзницей Германии — Японией. Атомные взрывы в Хиросиме и Нагасаки не только привели к капитуляции Японии, но и показали, что ядерное оружие может быть использовано по усмотрению политиков. Академик А.Д. Сахаров вспоминал: «Ирония судьбы: в 1945 г. Теллер вместе со Спиллардом считали, что нужна демонстрация атомной бомбы, а не ее военное применение, а Оппенгеймер убеждал, что решение этой проблемы следует предоставить военным и политикам (Теллер пишет, что он слишком легко дал себя переубедить)» [31]. Впоследствии отношение американских творцов ядерного оружия к применению своего детища диаметрально изменилось.

Для нашей страны 1945 г. стал переломным. Были выполнены все организационные работы по созданию промышленной базы для ядерного оружия. Координирующая роль лаборатории № 2 была многократно усилена после создания двух специальных правительственных организаций. Практически была начата хорошо скоординированная программа создания новой промышленности, успешно завершившаяся созданием отечественного ядерного оружия. Постановлением ГКО от 20 августа 1945 г. за № 9887 был создан Специальный комитет, наделенный особыми и чрезвычайными полномочиями для решения любых проблем Уранового проекта. В его состав входили:

Л.П. Берия — председатель;
М.Г. Первухин — заместитель председателя Совнаркома СССР;
Н.А. Вознесенский — председатель Госплана СССР;
Г.М. Маленков — секретарь ЦК КПСС;
Б.Л. Ванников — нарком боеприпасов;
В.А. Махнёв — секретарь Специального комитета;
П.Л. Капица — академик, директор ИФП АН СССР;
А.П. Завенягин — заместитель наркома внутренних дел;
И.В. Курчатов — начальник лаборатории № 2 АН СССР, научный руководитель проблемы.

Этим же постановлением при Специальном комитете был организован Технический совет, а 27 декабря — Инженерно-технический совет. Специальный комитет и его Технический и Инженерно-технический советы, начали активную работу по созданию атомной промышленности. Из Великобритании и США приходили разведывательные данные о ходе работ над ядерным оружием, которым, по воспоминаниям В.М. Молотова, еще в 1943 г. И.В. Курчатов давал высокую оценку. Эта информация, а также известное Сталину и Молотову личное заявление президента Трумэна на Потсдамской конференции в июле 1945 г. о наличии в США атомной бомбы ускорили принятие правительством чрезвычайных мер: на Урале были выбраны промышленные площадки для строительства Плутониевого комбината и завода по получению обогащенного ^{235}U . По словам Молотова, хотя Трумэн и пытался их ошарашить сообщением о создании в США сверхобычного оружия, было ясно, что этого оружия (атомных бомб) мало и развязать войну с СССР Америка в то время была не в состоянии. В нашей стране работы в этом направлении к тому времени только начинались [22].

Как вспоминал Эйзенхауэр, проблема использования атомных бомб для быстреего окончания войны с Японией обсуждалась в июле 1945 г. на Потсдамской конференции [32]: «...было принято решение, что если Япония не пойдет на быструю капитуляцию в соответствии с требованиями, переданными японскому правительству из Потсдама, то план использования атомной бомбы будет приведен в исполнение». Поэтому правительство СССР имело не только данные разведки о работах в США, но и данные об использовании ядерного оружия в военных целях. Специальному комитету было поручено в 1946 г. одновременно с подготовкой к вводу в действие первого исследовательского ядерного реактора Ф-1 обеспечить строительство промышленного ядерного реактора для наработки плутония.

Выбор и обследование строительной площадки на Южном Урале для первого промышленного реактора для наработки оружейного плутония были проведены в конце 1945 г. [33]. Туда выехала первая группа строителей. Руководителем стройки был назначен Я.Д. Раппопорт, главным инженером — В.А. Сапрыкин. Уже летом 1946 г. на площадке комбината (70 км севернее Челябинска) приступили к рытью котлована под первый промышленный реактор. Директором строящегося комбината 17 апреля 1946 г. был назначен П.Т. Быстров.

В 1945 г. был принят также ряд других важных решений:

30 августа создано ПГУ при Совнаркоме для повседневного руководства организацией атомной промышленности, координации всех ведущихся в стране научно-технических и инженерных разработок. В подчинение ПГУ кроме лаборатории № 2 были переданы: из Наркомата боеприпасов завод № 12 (г. Электросталь), Государственный союзный проектный ин-

ститут (ГСПИ-11, Ленинград) и машиностроительный завод № 48 (Москва); из НКВД комбинат № 6 по добыче урановой руды (Таджикистан), а также один из институтов — НИИ-9. На НИИ-9 были возложены все работы по урану, включая металлургию урана, плутония, их сплавов и получение изделий из них;

в декабре 1945 г. в Ленинграде при Кировском заводе (ЛКЗ) и заводе «Электросила» были созданы два специальных опытно-конструкторских бюро (ОКБ). Главной задачей ОКБ была разработка оборудования, производящего обогащенный ^{235}U методами газовой диффузии и электромагнитным;

1 декабря 1945 г. принято постановление о строительстве диффузионного завода около поселка Верх-Нейвинский на Среднем Урале для получения обогащенного ^{235}U ;

1 декабря 1945 г. организована лаборатория № 3 для работ по созданию тяжеловодных реакторов на природном уране;

в 1946 г. выбрана площадка около Арзамаса (г. Саров) под строительство филиала лаборатории № 2 — исследовательского комплекса для конструирования ядерного оружия (будущий ВНИИЭФ) [34];

намечено создание крупнейшего исследовательского комплекса под Москвой для работ по атомной программе для нужд ядерной энергетики. Будущий Физико-энергетический институт (ФЭИ) был построен в 110 км по Киевской дороге около станции Обнинское [35].

Специальный комитет ГКО и ПГУ для решения проблем геологической разведки и добычи природного урана, получения плутония и ^{235}U , создания ядерного оружия привлекали многие коллективы из других отраслей. Для целевой координации всех ведущихся в стране научных и инженерных разработок в состав руководства ПГУ вошли:

Б.Л. Ванников — начальник ПГУ, заместитель председателя Специального комитета;

А.П. Завенягин — заместитель наркома внутренних дел, первый заместитель начальника ПГУ;

П.Я. Антропов — заместитель члена ГКО по геологии;

А.Г. Касаткин — заместитель наркома химической промышленности;

Н.А. Борисов — заместитель председателя Госплана СССР;

П.Я. Мешик — заместитель наркома внутренних дел.

Несколько позднее в состав руководства ПГУ были введены:

Е.П. Славский — заместитель наркома цветной металлургии;

В.С. Емельянов — заместитель наркома черной металлургии;

А.Н. Комаровский — начальник Главпромстроя НКВД.

Создание ПГУ и подбор его руководителей, имевших опыт работы в смежных отраслях, позволили подчинить работу строек, предприя-

тий и институтов задачам создания атомной промышленности. Это, по-видимому, был первый отечественный опыт программно-целевого планирования.

Была четко определена финансовая политика. Госпланом СССР материально-технические фонды начали планироваться отдельной строкой. В сентябре 1945 г. при Н.А. Борисове была создана группа из 12 чел. в составе А.А. Черепнева, С.П. Столярова, Г.М. Лямкина, Ю.К. Петровича, Н.И. Шиколова, А.А. Ивашова, Н.В. Мартынова и др., которые затем вошли в состав подразделений ПГУ, ответственных за формирование планов работ, их финансирование, комплектацию кадров, оборудования и других проблем, возникших при формировании новой отрасли.

9 апреля 1946 г. Совет Министров* утвердил структуру ПГУ с соответствующими управлениями, отделами и центральным аппаратом. Так началась комплексная программа, четко скоординировавшая деятельность многих министерств, НИИ, лабораторий. Эта программа была тогда в стране программой № 1. П.Я. Антропов отвечал за геологическую разведку и организацию разработок урановых месторождений, а Е.П. Славский — за обеспечение работ по организации получения графита для реактора Ф-1 и промышленного реактора — наработчика плутония для первой атомной бомбы. А.П. Завенягин и А.Н. Комаровский, обеспечивали ускоренное создание необходимых для атомной промышленности предприятий, институтов, закрытых городов и специальных поселков. В.С. Емельянов был назначен начальником управления исследовательских организаций ПГУ и вместе с научным руководителем комплексной проблемы И.В. Курчатовым обеспечивал координацию и контроль деятельности всех привлеченных институтов и конструкторских бюро.

Сотрудники и руководство ПГУ и 9 Управления НКВД позднее размещались в д. 8а по Ново-Рязанской ул., недалеко от Казанского вокзала. По заявкам разработчиков, проектантов и строителей через ПГУ и Специальный комитет все необходимое выполнялось предприятиями разных отраслей в первую очередь. Постановлением от 20 августа 1945 г. было установлено, что все работы, проводимые в ПГУ и на предприятиях всех других ведомств для него, контролируются Специальным комитетом: «Никакие организации, учреждения и лица без особого разрешения ГКО не имеют права вмешиваться в деятельность Первого главного управления, его предприятий и учреждений или требовать справок о его работе или работах, выполняемых по заказам ПГУ». К работе в атомной промышленности привлекались любые специалисты страны.

В структуру ПГУ входили подразделения по планированию, финансированию и контролю всех работ как подчиненных ПГУ пред-

* 15 марта 1946 г. Совнарком был преобразован в Совет Министров СССР.

приятий,строек и институтов, так и привлеченных организаций других ведомств и институтов АН СССР. Были и подразделения комплектации кадров, капитального строительства и др.

Среди специализированных управлений ПГУ несколько позже было организовано управление по разделению изотопов урана, которое возглавил А.М. Петросьянец* — инженер-машиностроитель, генерал-майор, ранее работавший в Специальном комитете [28]. Управление по добыче урана и получения из него урановых блоков возглавляли С.Е. Егоров и Н.Ф. Квасков.



Фасад здания, в котором размещалось Первое главное управление

Научно-технический совет (НТС) ПГУ был образован 9 апреля 1946 г. вместо существовавших при Специальном комитете Техническо-

* С 1953 по 1955 г. — директор комбината № 813, с 1955 г. — заместитель министра Среднего машиностроения, а с февраля 1962 г. — председатель Государственного комитета по использованию атомной энергии СССР.

го и Инженерно-технического советов. Председателем НТС стал начальник ПГУ Б.Л. Ваников. При НТС было создано 5 секций, руководителями которых были назначены: № 1 (ядерные реакторы) — М.Г. Первухин*; № 2 (диффузионный способ обогащения урана) — В.А. Малышев*; № 3 (электромагнитное разделение изотопов урана) — И.Г. Кабанов и Д.В. Ефремов; № 4 (металлургия и химия) — В.С. Емельянов; № 5 (медико-санитарный контроль) — работники Минздрава СССР В.В. Парин и Г.М. Франк. И.В. Курчатов и В.Г. Хлопин были назначены научными руководителями соответствующих направлений атомной науки. 29 ноября 1947 г. Советом Министров СССР был утвержден расширенный состав НТС, в который вошли В.А. Малышев, И.Т. Тевосян, А.П. Завенягин, В.С. Емельянов, А.И. Алиханов, А.П. Александров, И.К. Кикоин, Н.Н. Семенов, С.Л. Соболев, И.Е. Старик, В.Б. Шевченко, Б.С. Поздняков и др. М.Г. Первухин был назначен первым заместителем начальника ПГУ и в течение 1947—1949 гг. выполнял обязанности председателя НТС. И.В. Курчатов был заместителем председателя НТС, а с 1949 г. — его бессменным председателем. Ученым секретарем НТС был назначен Б.С. Поздняков, ранее работавший начальником Технического управления Наркомтяжпрома.

Реорганизация структуры управления Уранового проекта укрепила роль и повысила ответственность лаборатории № 2 и научного руководителя всей атомной проблемы И.В. Курчатова. Работа лаборатории № 2, НИИ и КБ, заводов и строек, а также соисполнителей из различных ведомств была поставлена под жесткий, централизованный государственный контроль. На заседаниях Специального комитета регулярно заслушивались отчеты руководителей различных министерств о выполнении подчиненными отраслями заданий ПГУ. В аппарате ПГУ, на НТС и его секциях систематически рассматривались различные этапы работ по атомной программе. Первое такое рассмотрение прошло в сентябре 1945 г. на Техническом совете Специального комитета. Были рассмотрены ход работ и предложения ученых из лаборатории № 2 и других НИИ по следующим проблемам:

- получение плутония в уран-графитовых реакторах, охлаждаемых обычной водой, и в реакторах с тяжелой водой. Докладчики: И.В. Курчатов, А.И. Алиханов, Г.Н. Флёрв (5 сентября);

- состояние исследований по получению обогащенного урана газодиффузионным методом. Докладчики: И.К. Кикоин, П.Л. Капица (6 сентября);

- обогащение урана электромагнитным методом. Докладчики: Л.А. Арцимович, А.Ф. Иоффе (10 сентября).

* М.Г. Первухин и В.А. Малышев были заместителями председателя Совета Министров СССР и министрами химической промышленности и транспортного машиностроения соответственно. 12 августа 1953 г. В.А. Малышев возглавлял Государственную комиссию по проведению первого испытания термоядерного оружия. Умер 29 февраля 1957 г. от острого лейкоза.

По отдельным направлениям атомной проблемы задачи детализировались и назначались ответственные научные руководители. Постановлением СМ СССР от 16 декабря 1946 г. № 2697—1113 при президенте Академии наук СССР для руководства работами в областях изучения атомного ядра и других направлений науки, проводимых в интересах ПГУ, создается Ученый совет. Совет не только выдавал задания институтам различных ведомств, но и контролировал выполнение тематических планов совместно с руководителями министерств — участников работ по программе № 1.

В конце 1945 г. Специальным комитетом было принято решение по ускорению работ. Кроме ученых к атомной проблеме были привлечены конструкторы, технологи и производственники. В конце декабря правительством было принято решение об организации и немедленном развертывании работ по всему комплексу предприятий атомной промышленности.

Не были оставлены без внимания и проблемы воздействия радиации на человека и окружающую среду. Организация и обеспечение радиационной безопасности были поручены Минздраву СССР [11]. Заместитель министра здравоохранения А.И. Бурназян возглавил специальные подразделения в самом Минздраве и организовал их в ряде институтов и на предприятиях. Была создана система санитарного надзора и медицинского наблюдения. В 1946 г. была образована Радиационная лаборатория (впоследствии Институт биофизики Минздрава СССР), руководителем которой был назначен профессор Г.М. Франк. В задачу лаборатории входила разработка основ радиационной безопасности и дозиметрического контроля. В том же году в Тимирязевской сельскохозяйственной академии в соответствии с постановлением правительства о развитии работ по исследованию действия радиации на растительный мир была создана Биофизическая лаборатория (руководитель профессор В.М. Ключевский).

Создание ядерного реактора Ф-1

Впервые в отечественной печати данные о создании первого в СССР и на территории Европы физического ядерного реактора были изложены в докладе В.С. Фурсова в июле 1955 г. на сессии АН СССР по мирному использованию атомной энергии.

К началу 1946 г. в институтах и на предприятиях Мишцветмета и некоторых других отраслей были получены графит и уран высокой чистоты по разработанным лабораторией № 2 очень жестким техническим условиям. Требования к чистоте графита предусматривали, например,

содержание поглощающего тепловые нейтроны бора не более нескольких миллионных долей. Как отмечал В.В. Гончаров, работники завода воспринимали требования лаборатории № 2 как неосуществимые и утверждали, что изготовить графитовые блоки, чистота которых должна быть значительно выше, чем у алмаза (тоже углерода), невозможно. Существовавшая на заводе технология производства графитизированных электродов усилиями сотрудников предприятия и лаборатории № 2 была полностью изменена. Путем использования малозольного сырья и целого ряда мероприятий при осуществлении процессов термического и газового рафинирования удалось разработать специальный технологический процесс по выпуску графита требуемого качества.

Как пишет З.В. Ершова, работавшая тогда начальником лаборатории урана Гиредмета, не меньшие трудности были с получением металлического урана [11]. Однако графит и уран, поступившие из промышленности в лабораторию № 2, были неоднородны по свойствам и примесям, и поэтому необходимо было решить сложную задачу использования в первом реакторе всего разносортного графита и урана. Как отмечал В.С. Фурсов, имелись некоторые основания рассматривать предстоящую постройку уран-графитового реактора не как достаточно гарантированное предприятие, а как решающий эксперимент по измерению ядерных постоянных уран-графитовой системы. Физиков Германии на аналогичном пути в 1941–1942 гг. постигла неудача, так как измеренные ими сечения поглощения нейтронов графитом привели к ошибочному выводу: углерод вообще не может быть использован в качестве замедлителя нейтронов в ядерном реакторе на тепловых нейтронах, и поэтому там с самого начала отказались от попыток строить уран-графитовые реакторы.

Эксперименты по определению физических характеристик основных материалов уран-графитовой системы начались в лаборатории № 2 в 1944 г. [26]. К тому времени сотрудники лаборатории сумели достать 3,5 т графита фирмы Acheson и около 220 кг чистейшего оксида урана. По разработанной в лаборатории № 2 методике было определено эффективное сечение поглощения нейтронов графитом, равное $(5 \pm 3) \cdot 10^{-27} \text{ см}^2$, а также полное эффективное сечение взаимодействия урана с медленными нейтронами. Было также определено, что 1 кг урана самопроизвольно испускает 24 ± 7 нейтронов в 1 с.

Только во второй половине 1946 г. в лабораторию № 2 для создания котла малыми партиями начали поступать уран и графит, что дало возможность к ноябрю получить более 24 т урана и приблизительно 300 т графита (табл. 2). По мере их поступления около 30 рабочих (укладчиков) под руководством А.А. Журавлева собирали предварительные модели, увеличивая размеры которых можно было достичь критических размеров котла. Для контроля потока нейтронов была создана специальная пусковая аппаратура.

Одновременно увеличение нейтронного потока в центре моделей сборок измерялось по активности индиевой фольги, которая там размещалась и активировалась, захватывая нейтроны, образующиеся при делении ядер ^{235}U .

Таблица 2

Динамика поступления в лабораторию № 2 урана и графита при подготовке к осуществлению управляемой цепной ядерной реакции в 1946 г.

Дата	Радиус сборки с ураном, см	Масса урана, т	Масса графита в модели, т	Относительная активность индиевой фольги	Эффективный коэффициент размножения ($K_{\text{эф}}$) без кадмиевых стержней
1 августа	90	1,4	32	6	<1
25 «	150	6,3	86	20	<1
15 сентября	180	10,4	128	30	<1
15 октября	240	24,6	290	131	<1
25 декабря*	300	45,0	400	2500	1,00075

* При загрузке графитовых слоев ураном в центре модели (17-й слой) активность измерялась ВГЗ-камерой. Измерения проводили после извлечения двух регулирующих стержней с кадмием. 25 декабря в 18 ч при наличии в активной зоне одного стержня, введенного на 2,6 м, при догрузке небольшого количества урана была осуществлена управляемая ядерная реакция.

Проблема создания системы контроля за цепным ядерным процессом требовала знаний влияния на взрывоопасность, наличия в процессе цепного деления урана запаздывающих нейтронов, величин теплового расширения, появления шлаков и др. И.В. Курчатов и И.С. Панасюк отмечали: «После опубликования книги Смита [36] появилась возможность точного учета влияния запаздывающих нейтронов на кинетику котла, поскольку там приведены значения периодов запаздывания и проценты содержания 4 групп запаздывающих нейтронов. Эту работу проделал Козодаев М.С., который показал, что благодаря запаздывающим нейтронам котел с надкритичностью до $7 \cdot 10^{-3}$ вообще не взрывоопасен и его кинетика в этом случае, в основном, определяется периодами запаздывающих нейтронов» [26].

В 1945 г. было установлено, что для управления уран-графитовым котлом при надкритичности $(2-3) \cdot 10^{-3}$ достаточно введения в центральную зону котла одного поглощающего стержня диаметром 3–4 см из кадмия или бора. Если же надкритичность системы будет около $2 \cdot 10^{-2}$, то в уран-графитовой системе нужно 8–10 таких стержней, причем располагать их надо так, чтобы области возмущающего действия (в радиусе примерно 1 м) каждого из них не перекрывали бы друг друга. Авторы отчета [26] отмечали, что: «...практически все гасящие стержни должны быть так сконструированы, чтобы они могли мгновенно быть введены в котел при случайном увеличении надкритичности на опасную

величину». В стационарном режиме работы реактора надкритичность отсутствует, $K_{\text{эф}}=1$, уровень мощности постоянен и регулируется 1–2 стержнями, а все остальные — на «взводе» и как бы бездействуют.

Ниже приведен список ведущих специалистов лаборатории № 2 с указанием времени, с которого они начали участвовать в подготовительных работах, строительстве и пуске реактора Ф-1:

И.С. Панасюк, научный сотрудник, заместитель начальника сектора № 1 (14 августа 1943 г.);

Б.Г. Дубовский, научный сотрудник, начальник группы дозиметрии (1 сентября 1944 г.);

Н.В. Макаров, младший научный сотрудник, начальник группы радиотехнических приборов (апрель 1945 г.);

А.А. Журавлев, старший инженер, руководитель проектирования и сборки реактора (май 1945 г.);

И.Ф. Жежерун, младший научный сотрудник, начальник группы испытания урана и графита (февраль 1946 г.);

В.А. Кулаков, младший научный сотрудник (март 1946 г.);

Е.Н. Бабулевич, младший научный сотрудник, начальник группы автоматики и управления реактором (март 1946 г.);

К.Н. Шлягин, младший научный сотрудник (март 1946 г.);

Н.М. Конопаткин, младший научный сотрудник (март 1946 г.);

В.С. Апастаневич, старший научный сотрудник (июль 1946 г.);

В.А. Зверева (Кутукова), инженер (июль 1946 г.);

В.И. Чурик, заместитель начальника по административно-хозяйственной части (август 1946 г.);

В.В. Скляревский, младший научный сотрудник (сентябрь 1946 г.);

М.Б. Егiazаров, младший научный сотрудник (ноябрь 1946 г.);

В.Н. Чернышев, младший научный сотрудник, начальник корпуса К (январь 1947 г.);

В.П. Подзоров, старший инженер (апрель 1947 г.).

Вместе с мастерами, рабочими и лаборантами в апреле 1947 г. на реакторе Ф-1 работал 81 сотрудник [26]. Многие из них впоследствии длительное время работали на Плутониевом комбинате в Челябинске-40, осуществляя пуск и обеспечивая эксплуатацию первого промышленного ядерного реактора.

В ходе экспериментов на реакторе Ф-1 было установлено, что диаметр блоков из металлического урана в пределах 30–40 мм слабо влияет на коэффициент размножения нейтронов. Для размещения урана в графитовых кирпичах размерами 100х100х600 мм было просверлено на расстоянии 200 мм одно от другого более 30 тыс. отверстий. В окончательном варианте для построения реактора была принята квадрат-

ная решетка с шагом* 200 мм. В узлах решетки размещались урановые блоки различных диаметров, а также прямоугольные и шаровые брикеты из оксида урана. Всего в реактор было загружено 45,07 т урана и 400 т графита (табл. 3). Реактор начал работать при несколько меньшей загрузке урана (≤ 45 т).

Таблица 3

Количество урана и его оксидов, загруженных в первый ядерный реактор

Урановое изделие	Масса, кг	Число	Общая масса, т
Оксид урана — брикеты размером 49х58х67 мм	0,88	3143	2,77
Оксид урана — шары диаметром 80 мм	1,18	7473	8,8
Металлический уран — блоки диаметром 32 мм и длиной 100 мм	1,4	2503	3,5
Металлический уран — блоки диаметром 35 мм и длиной 100 мм	1,7	17523	30,0
Всего...	—	30642	45,07

Исторический пуск реактора и порядок сборки графита и урана в специально построенном здании с подземной лабораторией (на территории лаборатории № 2) подробно описан (рис. 1–3) [26, 27]. Цель первого этапа исследований — самоподдерживающаяся цепная ядерная реакция — была достигнута в 18 ч 25 декабря 1946 г. При первых пусках реактора, проводившихся под руководством И.В. Курчатова, присутствовали Н.И. Павлов (уполномоченный Совета Министров СССР) и научные сотрудники сектора № 1 И.С. Панасюк, Е.Н. Бабулевич, Б.Г. Дубовский, И.Ф. Жежерун, А.А. Журавлев, Н.В. Макаров, К.Н. Шлягин, а также лаборанты А.К. Кондратьев и Р.С. Силаков [27].

Реактор не имел принудительного отвода тепла, но за счет теплоемкости системы удавалось кратковременно (в течение нескольких минут) поднимать мощность реактора до 3,89 МВт. При этом за счет извлечения стержней системы управления реактора создавалась надкритичность ($K_{эф} > 1$): $K_{эф} - 1 = 2 \cdot 10^{-3}$, а затем система самокомпенсировалась: из-за разогрева урана мощность резко снижалась. За 30 мин суммарное энерговыделение составляло 540 кВт·ч. Во время таких больших пусков реактора Ф-1 происходило максимальное накопление плутония в загруженных в активную зону урановых блоках (миллиграммы продукта в 45 т урана). Активная зона реактора Ф-1, собранная из графитовых кирпичей и урановых блоков, представляла собой сферу диаметром 6 м. Отражатель нейтронов вокруг нее имел толщину 800 мм. В реакторе были 3 вертикальных канала для стержней системы управления и защиты (СУЗ) и 6 эксперименталь-

* Расстояние между отверстиями в графитовых кирпичах для загрузки урановых блоков.

ных горизонтальных каналов. Реактор имел отрицательный температурный коэффициент реактивности и, как видно из рис. 4, мощность самопроизвольно снижалась с 3,89 МВт до существенно меньших значений. Из-за медленного остывания графита через 30 мин от начального момента большого пуска реактора для прекращения управляемой цепной реакции сбрасывались стержни СУЗ. Анализ различных пусков реактора Ф-1 позволил определить значения температурных коэффициентов отдельно для урана и графита. Реактор оказался саморегулирующейся системой, что делало его эксплуатацию безопасной.

Как уже отмечалось, реактор Ф-1 не имел системы охлаждения и биологической защиты от радиационных излучений, сопровождающих цепную ядерную реакцию. Система вентиляции, нагнетающая воздух в котлован с реактором, производительностью около 7 тыс. м³/ч обеспечивала радиационную безопасность только при работе реактора на мощности до 10 кВт. При работе же реактора на большой мощности, когда осуществлялись так называемые большие пуски, радиоактивные газы, выделяющиеся из урана, проникали в окружающие реактор помещения и не допускали присутствия на реакторе эксплуатационного персонала. Такие большие пуски, когда мощность реактора поднимали >100 кВт, а кратковременно даже примерно до 4 МВт, осуществлялись при дистанционном управлении реактором. Управление в этих случаях проводилось из главного

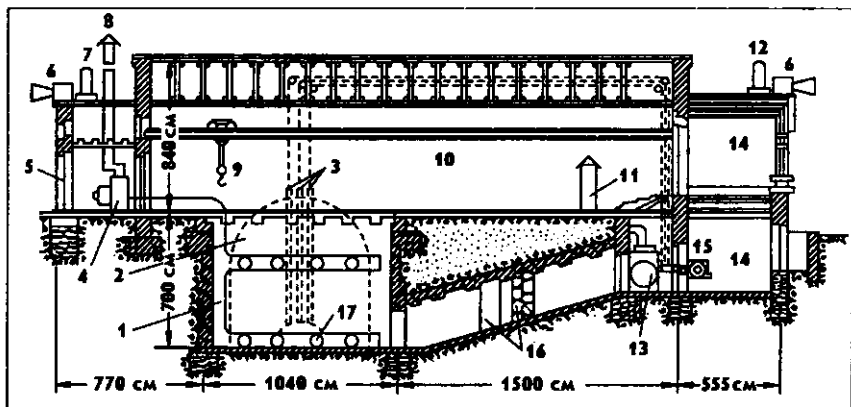


Рис. 1. Схема продольного разреза здания реактора в первые годы его эксплуатации [27]:

1 – котлован 10×10×7 м; 2 – реактор и его модели (контуры); 3 – регулирующий и аварийные стержни; 4, 8, 17 – система вытяжной вентиляции воздуха; 5 – ворота здания; 6, 7, 12 – звуковая и световая сигнализация радиационной опасности вокруг здания; 9 – подъемный кран; 10 – главный зал; 11, 13 – система нагнетающей вентиляции воздуха; 14 – подземная лаборатория; 15 – лебедка для дистанционного ручного управления стержнями; 16 – проход из подземной лаборатории в котлован.

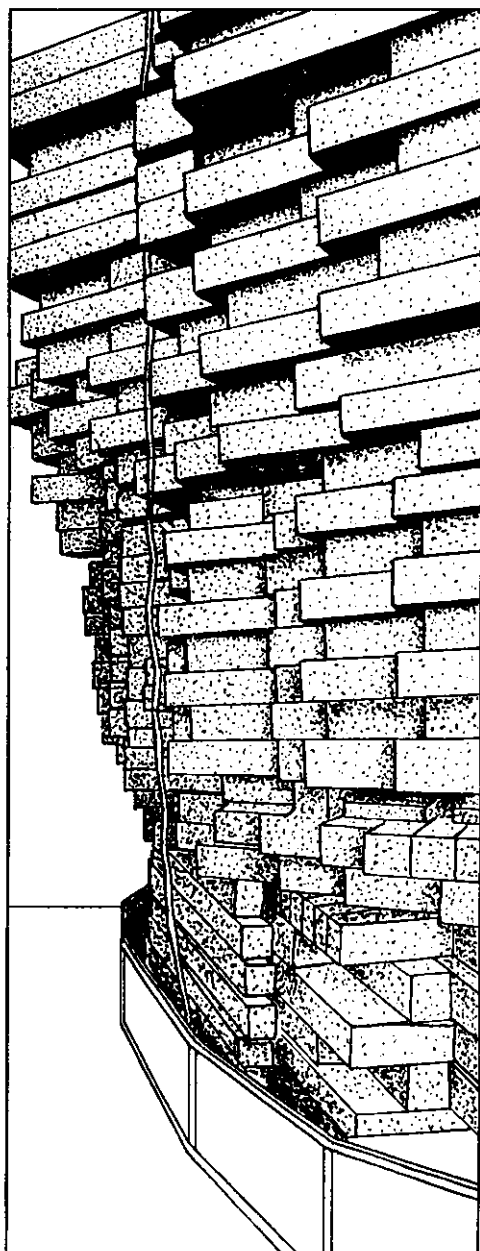


Рис. 2. Вид на ядерный реактор со дна котлована.

Внизу графитовой кладки виден металлический барьер для защиты нижних слоев графитовой кладки отражательной зоны реактора от случайного попадания воды на дно котлована [37]

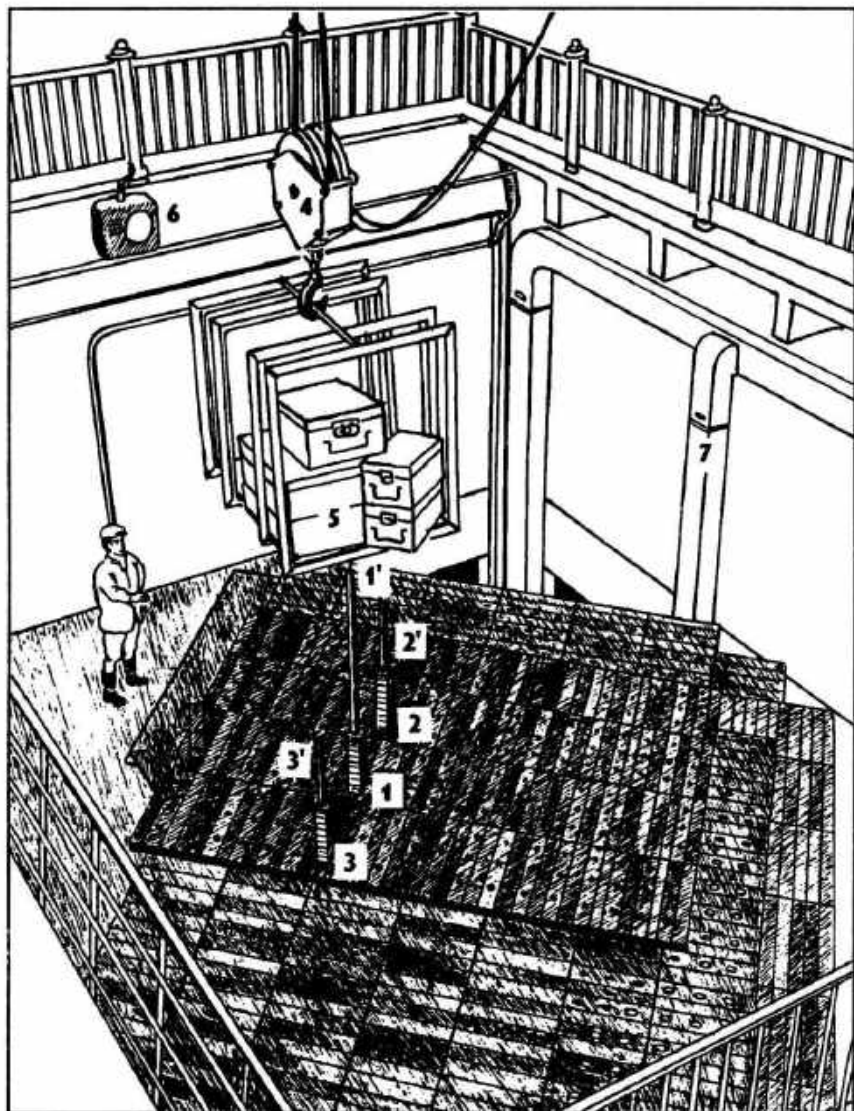


Рис. 3. Сборка первого ядерного реактора в надкритическом состоянии ($K_{эф} > 1$) [27]:

1–3 – вертикальные каналы диаметром 55 мм; 1' – кадмиевый регулирующий стержень диаметром 50 мм; 2', 3' – кадмиевые аварийные стержни (50 мм); 4 – узел мостового крана; 5 – ящики с урановыми блоками; 6 – громкоговоритель, связанный с оператором у пусковой ВФЗ-установки; 7 – вентиляционная система

здания лаборатории № 2, находящегося от реактора на расстоянии около 1,5 км. Подготовка реактора к работе на большой мощности заключалась в следующем [26]: «Перед каждым таким пуском тщательно проверялась надежность работы дистанционного управления и сбрасывания кадмиевых стержней, поскольку после больших пусков или, тем более, во время работы котла на большой мощности, подойти к зданию К нельзя было из-за опасности подвергнуться смертельному облучению радиацией котла». В главном здании лаборатории № 2 при работе котла на мощности 500–1000 кВт фон возрастал в десятки раз, а биологически опасное пространство вокруг здания реактора было в радиусе до 200 м. «Для охраны этого пространства во время больших пусков применялось оцепление специальными вахтерами» [26].

Состояние дозиметрического контроля осуществлялось при пуске котла созданными в лаборатории № 2 образцами разработанных дистанционного дозиметра и дозиметра, измеряющего наличие радиоактивного газа в воздухе. Сотрудниками Радиационной лаборатории были разработаны индивидуальные интегрирующие дозиметры с применением наперстковых ионизационных камер и фотопленки. И.В. Курчатов и И.С. Панасюк отмечали: «С помощью этих приборов мы осуществляли службу биологической безопасности и производили биологические опыты с животными. Серьезных поражений людей, обслуживающих Первый Советский атомный котел, не было; этому также помогало то обстоятельство, что сотрудники, получившие дозы облучения, опасные для здоровья, немедленно отстранялись от работы и направлялись на отдых в санаторий».

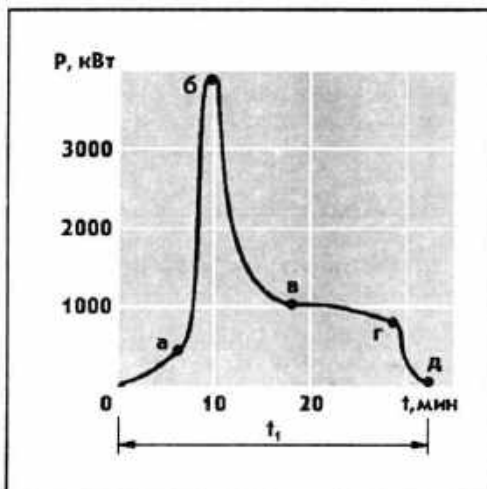


Рис. 4. Типичный график изменения мощности со временем при большом пуске реактора (стержни СУЗ полностью извлечены) [27]:

аб – быстрый подъем мощности после освобождения реактивности $2 \cdot 10^{-3}$; **б** – точка самокомпенсации реактора ($K_{эф} = 1$); **бв** – быстрый спад мощности за счет нагревания урана; **вг** – медленный спад за счет нагревания графита; **гд** – спад после сброса стержней СУЗ

Кроме осуществления управляемой ядерной реакции и наработки миллиграммовых количеств плутония, в 1947 г. в реакторе Ф-1 в экспериментальные каналы стали загружать специальные поглощающие нейтроны материалы для наработки искусственных радиоактивных элементов. Эти поглотители нейтронов делали невозможным достичь $K_{эф}=1$ (без загрузки урана). Поэтому были проведены эксперименты с четырьмя моделями загрузки реактора (табл. 4), когда $K_{эф}$ был больше значения, достигнутого при пуске реактора. Этот избыток размножающей способности при работе на постоянной мощности ($K_{эф}=1$) компенсировался загрузкой поглотителей нейтронов («мишеней») для наработки радиоактивных изотопов, выделяемых в Радиационной лаборатории АМН СССР и НИИ-9.

Таблица 4

Эффективные коэффициенты размножения реактора при увеличении загрузки урана и толщины отражателя

Дата	Число слоев		$K_{эф}$ без кадмиевых стержней
	загруженных ураном	графита	
25 декабря 1946 г.	54	54	1,00075
17 января 1947 г.	55	56	1,00224
22 марта 1947 г.	55	57	1,00400
3 мая 1947 г.	55	57,4	1,00450

На реакторе Ф-1 были проведены необходимые исследования для определения размеров и физических параметров, а также подтверждена работоспособность промышленного уран-графитового реактора. В таких экспериментах использовались урановые блоки с оболочкой из алюминия или его сплавов. Из алюминия были выполнены и технологические каналы (ТК), в которые загружались блоки. В зазоре блок—канал должна находиться вода для отвода выделяющегося тепла. Надо было уточнить шаг решетки активной зоны будущего промышленного реактора, определить оптимальные зазоры для прохождения теплоносителя (обычная вода) через каналы. Вода, а также конструкции из алюминия являются дополнительными поглотителями нейтронов. Поэтому важнейшей задачей было исследование критических значений параметров реактора. Для этого изучались различные компоновки решеток с шагом от 15 до 25 см и диаметрами урановых блоков 30, 35 и 40 мм. Зазор между оболочкой и алюминиевой трубой заполнялся парафином, который сравним по поглощению нейтронов с водой. Из экспериментов с 30 различными решетками становилось очевидным, что количество урана и графита в промышленном реакторе для достижения управляемой цепной реакции должно быть увеличено в 3—4 раза. Расчетные оценки размеров промышленного реактора проводились в соответствии с разработан-

ными в 1944 г. физиком-теоретиком И.Я. Померанчуком уравнениями для определения критической массы ядерного реактора. В.С. Фурсов, впоследствии заместитель научного руководителя по уран-графитовым реакторам, предложил формулу, по которой различие $K_{\text{эф}}$ реактора Ф-1 с полученными данными $K_{\text{эф}}$ для испытываемых решеток определяло эффективный радиус реактора, то есть его загрузку ураном и размеры графитовой кладки. Кольцевой слой воды в зазоре блок—труба изменялся от 2 до 4 мм.

На первом в Европе исследовательском реакторе были изучены оптимальные характеристики промышленного реактора для наработки оружейного плутония. Тем самым была доказана реальность создания ядерного оружия с использованием плутония.



Первый промышленный ядерный реактор А

Первые шаги по созданию атомной промышленности начались еще до создания Специального комитета и ПГУ, а также до строительства на Южном Урале Плутониевого комбината. Государственный комитет обороны решением от 15 мая 1945 г. утвердил на 1945—1946 гг. увеличение производственных мощностей предприятий 9 Управления НКВД. Этим же решением поручалось увеличить добычу урановой руды на комбинате № 6 и мощность заводов по переработке руды и урановых концентратов. До 1 января 1946 г. намечалось закончить в Москве строительство и оснащение помещений НИИ-9. На этот институт возлагалась ответственность за извлечение урана из руд и получение из него изделий для использования в опытном реакторе лаборатории № 2 и уран-графитовом промышленном реакторе для наработки плутония. Из режимных соображений институт тогда назывался базой № 1 [38].

12 августа 1945 г. в США была издана книга Г. Д. Смита по использованию атомной энергии в военных целях [36]. Автор писал: «Стоимость проекта, включающего возведение целых городов и невиданных доселе заводов, растянувшихся на многие мили, небывалая по объему экспериментальная работа — все это, как в фокусе, сконцентрировано в атомной бомбе. Никакая другая страна в мире не была бы способна на подобную затрату мозговой энергии и технических усилий». Г. Д. Смит и разрешившие публикацию его книги руководители США ошиблись: в послевоенный период такой страной стал Советский Союз. Подтверждением этого явилось обеспечение разработки технологий и оборудования для интенсивно строящихся тогда комбината № 6 в Средней Азии и ряда крупнейших предприятий на Урале. Начиная с 1946—1947 гг. важнейшим из вновь создаваемых объектов становится промышленный ядерный реактор. Окончанию его строительства предшествовали экспериментальные исследования по обоснованию физических параметров на реакторе Ф-1 в лаборатории № 2.

О чрезвычайности мер, связанных с начальным периодом создания атомного проекта, можно судить по воспоминаниям ветерана атомной промышленности В.Ф.Калинина, с которым автору неоднократно приходилось обмениваться информацией.

В.Ф.Калинин с 1945 г. был привлечен к работам нашей отрасли. Он был первым ученым секретарем секции ядерных реакторов, которая входила сначала в состав Инженерно-технического совета, а затем — НТС ПГУ. Впоследствии В.Ф.Калинин работал в аппарате Минсредмаша СССР, был одним из организаторов создания центрального отраслевого института информации. Он и перевел книгу Г.Д.Смита, фотокопии которой были получены нашей разведкой во второй половине 1945 г. Эта книга еще до ее появления в открытой печати способствовала подготовке уже в 1945 г. основополагающего постановления правительства по развитию различных направлений атомной программы и в первую очередь — по созданию первого промышленного ядерного реактора на Южном Урале недалеко от г. Кыштыма.

Как же готовились тогда постановления ГКО и правительства?

В 1945 г. на узком совещании у М.Г.Первухина (присутствовали только И.В.Курчатов, В.С.Емельянов, Б.С.Поздняков, В.Ф.Калинин и В.И.Меркин) было сделано краткое сообщение И.В.Курчатова о получении фотокопии книги Г.Д.Смита и важности изложенных в ней материалов. В.Ф.Калинин был направлен на указанное совещание директором Государственного института азотной промышленности (ГИАП) Наркомхимпрома, которому М.Г.Первухин поручил прислать специалиста-машиностроителя, хорошо знающего английский язык. В.Ф.Калинин уже был кандидатом технических наук и руководил бюро по химическому машиностроению. Сразу же после совещания М.Г.Первухин поручил В.Ф.Калинину в течение ночи прочесть книгу Г.Д.Смита и доложить ее содержание. Рано утром В.Ф.Калинин с материалами был направлен в лабораторию № 2. Вместе с группой других специалистов, привлеченных И.В.Курчатовым, он был переведен на казарменное положение для подготовки постановления правительства по развитию работ над Урановым проектом. В течение недели они не покидали лабораторию № 2. В проекте постановления были названы основные предприятия, НИИ и КБ, строительные и монтажные организации различных ведомств, которые должны были активно участвовать в реализации атомной программы. Именно В.Ф.Калинину, знающему работы московского НИИХиммаша, принадлежит инициатива назначения директора этого института профессора Н.А.Доллежалю главным конструктором первого в СССР промышленного ядерного уран-графитового реактора (1946 г.). Главным технологом реактора был В.И.Меркин (лаборатория № 2), главным инженером строительной части проекта — А.А.Черняков (ГСПИ-11).

Подготовленное правительственное постановление позволило в послевоенный период развернуть работы по получению плутония и высокообогащенного ^{235}U — основных материалов, составляющих атомную бомбу. Десятки тысяч рабочих и строителей разных специальностей, ИТР и ученых многих отраслей промышленности, Главпромстроя НКВД и военных строителей Наркомата обороны были привлечены к работам нарождающейся атомной промышленности. Достаточно сказать, что в 1947—1948 гг. на площадке Плутониевого комбината работало около 45 тыс. чел. После организации ПГУ подобного рода постановления правительства по атомной программе готовились тоже в авральном порядке, но в основном уже сотрудниками ПГУ и Специального комитета.

Ранее в лаборатории № 2 рассматривались три наиболее перспективные схемы реакторной установки с использованием природного урана: тяжеловодный, газографитовый и водографитовый. К середине 1945 г. предпочтение было отдано уран-графитовому реактору. Одновременно было решено такую же концепцию заложить в проект промышленного реактора, охлаждаемого обычной водой, мощностью 100 МВт. Непросто было решить, сбрасывать ли большие объемы прошедшей через реактор охлаждающей слабоактивной воды в близлежащий водоем — озеро Кызыл-Тяш (площадь 19 км², объем воды 83 млн. м³), или пропускать эту воду через систему очистки и использовать многократно. В последнем варианте в оборудовании очистного контура должно накапливаться большое количество радионуклидов. Опыта обращения с высокоактивными отходами практически не было.

На секции № 1 Инженерно-технического совета 12 января 1946 г. были заслушаны доклады специалистов Всесоюзного теплотехнического института (ВТИ) Э.Н.Ромма (варианты водоснабжения) и В.Г.Прохорова (варианты водоочистки). Секция рекомендовала ВТИ проектировать проточный вариант охлаждения промышленного реактора* и создать необходимые системы водоочистки. Эта схема предусматривалась и для будущих производственных уран-графитовых реакторов, строившихся на комбинате № 817. Такое решение было вынужденным, так как создать в кратчайшие сроки более сложные технологические схемы в условиях послевоенного времени было невозможно.

В напряженной работе по созданию научных основ промышленного реактора в лаборатории № 2 под руководством И.В.Курчатова принимали участие В.В.Гончаров, И.С.Панасюк, В.И.Меркин, П.И.Шестов, Н.С.Богачев, И.И.Гуревич, В.С.Фурсов, Б.Г.Дубовский,

* Как показал последующий опыт, этот вариант при нормальной эксплуатации реакторов не приводил бы к радиоактивному загрязнению окружающей среды. Но после аварий, связанных с разрушением в реакторах урановых блоков, озеро Кызыл-Тяш было загрязнено радионуклидами существенно выше санитарно допустимых норм и стало использоваться в качестве «замкнутого» водоема.

Н.Ф.Правдюк, М.И.Певзнер, М.С.Козодаев, С.М.Фейнберг, С.А.Скворцов, Ю.А.Прокофьев. После 1947 г. у многих из них, как и у сотрудников других институтов и предприятий, постоянным рабочим местом стала площадка промышленного реактора [11].

В своих записках главный конструктор Н.А.Доллежалъ отмечает, что он был привлечен к реализации атомной программы в январе 1946 г. М.Г.Первухиным, работавшим тогда наркомом химической промышленности [39]. Сразу же Б.С.Поздняков — ученый секретарь НТС вместе с И.В.Курчатовым поставили перед Н.А.Доллежалем задачу: в кратчайший срок создать урановый котел промышленного назначения. Первые исходные данные для этого котла лаборатория № 2 предоставила исходя из горизонтального расположения ТК, в которых размещались урановые блоки, охлаждаемые водой. Эта схема была аналогична военным реакторам, построенным в Ханфорде. Разработка реактора для промышленного производства плутония велась в условиях «холодной войны», которая началась после известного выступления У.Черчилля в Фултоне 5 марта 1946 г. Сроки, установленные Специальным комитетом и руководством ПГУ, были жесткими, и главный конструктор обязан был представить технический проект реактора и рабочие чертежи основных деталей к августу 1946 г. Для работы над проектом сразу же в НИИХиммаше было создано пять групп конструкторов. Ими руководили П.А.Деленс, В.В.Рылин, В.В.Вазингер, Б.В.Флоринский и М.П.Сергеев. На секции № 1 Инженерно-технического совета еще 26 декабря 1945 г. лаборатории № 2 было поручено доработать и вертикальный вариант реактора. Работая над конструкцией реактора и его технологических систем, Н.А.Доллежалъ в феврале 1946 г. предложил вместо горизонтальной схемы вертикальное размещение ТК. В этом варианте снимались проблемы деформации многих конструктивных элементов работающего реактора. При нагревании конструкции они переставали быть нагруженными. Уже в марте 1946 г. комиссия с участием крупных специалистов — физиков, металлургов, машиностроителей, химиков, руководителей атомного проекта И.В.Курчатова, В.А.Малышева, Б.Л.Ванникова, М.Г.Первухина, А.П.Завенягина, В.С.Емельянова, Б.С.Позднякова и Е.П.Славского одобрила вертикальный вариант компоновки реактора. Окончательное решение по вертикальной схеме было принято только 8 июля 1946 г. Горизонтальный вариант реактора продолжали разрабатывать конструкторы КБ-10 — будущего ОКБ «Гидропресс» и проектанты ГСПИ-11.

В НИИХиммаше решением правительства был создан специальный гидросектор. В его состав включали конструкторов из других организаций. К работе НИИХиммаша над проектом были привлечены также следующие институты и КБ: «Проектстальконструкция» (директор Н.П.Мельников), КБ Министерства авиационной промыш-

ленности (начальник А.С.Абрамов), Институт авиационных материалов (директор А.В.Акимов), ИФХ (директор академик А.Н.Фрумкин), Всесоюзный институт гидромашиностроения (подразделение профессора В.В.Мишке). Проект здания реактора и другие сооружения, обеспечивающие охлаждение реактора, выполнялись в ГСПИ-11. Все строительные чертежи под руководством главного инженера проекта А.А.Чернякова также выполнялись в ГСПИ-11 [39]. Институт стал генеральным проектировщиком всех заводов комбината и г. Челябинска-40.

24 апреля 1946 г. на секции № 1 НТС (М.Г.Первухин, И.В.Курчатов, Б.С.Поздняков, Н.А.Доллежал, Б.М.Шолкович, Э.Н.Ромм, В.Ф.Калинин и др.) с участием руководителей: от ПГУ — Б.Л.Ванникова, Е.П.Славского, А.Н.Комаровского; от комбината № 817 — директора П.Т.Быстрова — был принят генеральный план комбината № 817, предложенный ГСПИ-11 и лабораторией № 2. В нем были определены расположение реактора, систем для проточного охлаждения, объекты водоподготовки и химической очистки воды, место для жилого поселка. Главному инженеру проекта А.А.Чернякову было поручено проработать вопросы аварийного охлаждения реактора, включая строительство постоянно работающей ТЭЦ мощностью 2 МВт и создание водяных аварийных баков емкостью до 500 м³.

Общее научное руководство и контроль за разработкой конструкции реактора непрерывно осуществлял И.В.Курчатов. Н.А.Доллежал отмечает: «Каждые 3–4 дня в институт заезжал И.В.Курчатов, обычно в сопровождении кого-либо из руководства ПГУ или директоров, сотрудничавших с нами, и неизменно В.И.Меркина, которого он называл своим главным технологом» [39].

НИИхиммаш имел свой экспериментальный завод и поэтому быстро создал все необходимые стенды, что позволило проверить работоспособность деталей и различных узлов. Усилиями больших коллективов конструкторов, металлургов, машиностроителей, металлургов и прибористов, специалистов по коррозии и водно-химическому режиму охлаждения урановых блоков была создана надежная конструкция промышленного ядерного реактора со всеми необходимыми системами контроля и управления ядерной цепной реакцией.

Несмотря на возражения руководства секции № 1, по предложению В.И.Меркина было решено в реакторе А каждый ТК с охлаждаемыми урановыми блоками снабдить четырьмя системами контроля: снижения и повышения расхода воды (сигналы СРВ и ПРВ), определения температуры охлаждающей воды на выходе из канала и влажности в зазоре труба—графит. В верхней части каждого ТК находился специальный клапан, который обеспечивал поступление



**ИГОРЬ
ВАСИЛЬЕВИЧ
КУРЧАТОВ**
(1903–1960) –
научный
руководитель
комбината № 817
с 1947 г., академик
с 1943 г.

воды рабочего хода (от насосов давлением около 8 атм) для охлаждения урановых блоков работающего на мощности реактора. Этот клапан имел два положения и мог обеспечивать при снятии мощности минимальный расход охлаждающей воды через ТК. При аварийном отключении насосов реактор «заглушался» – останавливался и из аварийных баков через открытый в ТК клапан вода холостого хода поступала для снятия остаточного энерговыделения. Промежуточное положение клапана не допускалось и могло привести к резкому снижению расхода воды в работающем на мощности канале с урановыми блоками и вызвать их разрушение. Кроме того, сигналы датчиков СРВ и ПРВ от всех каналов поступали в СУЗ. Температура воды на выходе из каналов замерялась операторами вручную на «штатерной панели» пульта управления (в шутку этих операторов, обычно женщин, называли «температурными девочками», 4 чел. в смену). Влажность воздуха в зазоре труба–графит замеряли на пульте определения влаги также вручную. Изменение этих параметров позволяло выявить поведение урановых блоков, их зависание и нарушение герметичности ТК, после чего из ТК срочно выгружали уран, а если урановые блоки застревали (зависали) в нем, то реактор останавливался. А так как таких каналов было более тысячи, можно представить сложности, которые могли возникать при эксплуатации реактора и ставили под сомнение его работоспособность. Кроме этих систем под руководством А.С.Абрамова была создана СУЗ, которая не только регулировала распределение мощности по радиусу активной зоны реактора, но и гарантировала «заглушение» цепной реакции при появлении аварийных сигналов ПРВ и СРВ или при обезвоживании активной зоны.

Среди главных систем, без которых реактор не мог работать, надо назвать систему загрузки и разгрузки урановых блоков; систему аварийного охлаждения реактора при отключении электроэнергии или прорыве трубопроводов, подающих в реактор воду.

Следует отметить, что система разгрузки из реактора урановых блоков, разработанная под руководством Н.А.Доллежаля, на стенде в институте была проверена лишь на единичном канале. При массовом изготовлении разгрузочных механизмов выявились существенные недостатки конструкции: разгрузка приводила к «закусу», то есть урановые блоки застревали. От этой системы пришлось отказаться. Срочно разработать и изготовить новую систему разгрузки было поручено Горьковскому машиностроительному заводу (ГМЗ) (главный конструктор системы Ю.Н.Кошкин). Это так называемая каскадная система. Она оказалась работоспособной и впоследствии использовалась на всех реакторах подобного типа. Замена системы разгрузки задержала пуск реактора на несколько месяцев.

Аварийное энергообеспечение реактора должно было осуществляться специально построенной ТЭЦ на угле начальной мощностью 2 МВт. Эта постоянно работающая ТЭЦ, как вспоминает ветеран атомной промышленности И.П.Лазарев, в случае отключения систем Уралэнерго обеспечивала аварийное охлаждение не только реактора А, но и других реакторов. После увеличения мощности ТЭЦ до 10 МВт при нормальном энергообеспечении ядерных реакторов энергия аварийной ТЭЦ передавалась в общую энергосеть. Первым руководителем цеха сетей и подстанций комбината был В.И.Сурков.



**НИКОЛАЙ
АНТОНОВИЧ
ДОЛЛЕЖАЛЬ –**

**главный
конструктор
ядерного реактора,
академик
с 1962 г.**

После выгрузки из реактора облученные блоки выдерживали в специальных бассейнах с водой для распада короткоживущих радионуклидов. После снижения активности блоки перевозили в специальных вагонах-контейнерах на радиохимический завод.

Для обеспечения нормальной работы через реактор прокачивалось несколько тысяч кубометров специально очищенной охлаждающей воды. Для этого были построены специальные насосные станции, а также отдельные здания водоподготовки и химической очистки воды, поступающей для охлаждения реактора из озера Кызыл-Тяш, находящегося на расстоянии примерно 1 км от реактора. Практически все принципиальные вопросы создания реактора рассматривались на секции № 1 или на заседаниях НТС. Рабочие чертежи ядерного реактора и основные материалы проектных институтов согласовывались И.В.Курчатовым и после утверждения руководством ПГУ принимались к срочному исполнению заводами-изготовителями. В случае необходимости ПГУ вместе с учеными готовили постановления правительства, обязывающие промышленность срочно поставлять на стройку все предусмотренное атомной программой.

Как уже отмечалось, для загрузки промышленного реактора необходимо было около 150 т особо чистого урана в виде урановых блоков и ≥ 1200 т графита с ничтожными примесями вредных материалов (бор и др.).

Урановые блоки при накоплении в них определенного количества плутония должны регулярно, через несколько месяцев, перегружаться. Изделия же из графита (размеры кирпичей были выбраны $200 \times 200 \times 600$ мм) для активной зоны и для боковых и торцевых отражателей после их сборки и монтажа биологической защиты должны быть работоспособны в течение всего срока работы промышленного реактора без замены. Поэтому технологию изготовления урановых блоков можно было в дальнейшем совершенствовать, а графит при плохом качестве сразу делал невозможным создание в реакторе управляемой цепной ядерной реакции. Проводимые в лаборатории № 2 и на Московском электродном заводе проверки (под руководством В.В.Гончарова и Н.Ф.Правдюка) подтверждали, что качество графита не вызывает сомнения в возможности создания работоспособного реактора.

На заводах производство графита осуществлялось под научным руководством К.Т.Банникова. Практической работой на Московском заводе Наркомцветмета, которому было поручено из электродной массы изготавливать графит для ядерных реакторов, руководил заместитель наркома Е.П.Славский. В своих воспоминаниях Е.П.Славский отмечал [40]: «Научились мы все-таки делать чистый графит. Всю эту электродную массу мы с хлором замешивали, в аппаратной накаляли докрасна. Посторонние примеси, соединившись с хлором, при высокой температуре становились летучими и вылетали. И мы стали

получать чистый графит». Производство урановых блоков для промышленных реакторов проводилось на заводе № 12 в г. Электростали.

При производстве графита была введена классификация сортности. Качество графита оценивалось физическим индексом, зависящим от способности поглощать нейтроны.

Строительство и пуск реактора

Руководство большой стройкой здания реактора и других объектов комбината, а также города в середине 1947 г. было поручено генералу М.М.Царевскому, имевшему до этого опыт строительства Горьковского автомобильного завода, Нижнетагильского металлургического комбината и других крупнейших строек страны. Это назначение производил Л.П.Берия, посетивший стройку 8 июля 1947 г.

При выборе площадки под строительство города были проведены исследования направления ветра, проработаны вопросы разбавления примесей, выбрасываемых в атмосферу реакторным и радиохимическим производствами, определены оптимальные размеры труб промышленных объектов так, чтобы промышленная площадка не оказывала вредного влияния на город. Под руководством главного инженера строительства В.А.Сапрыкина специально созданный исследовательский отряд выдал необходимые рекомендации по рациональному размещению различных производственных объектов и будущего города Челябинска-40. О высоких деловых качествах главного инженера строительства, будущего академика архитектуры В.А.Сапрыкина написано достаточно много [33]: Общее руководство строительством комбината и обеспечение его всем необходимым осуществлялось лично Б.Л.Ванниковым, заместителями начальника ПГУ А.П.Завенягиным и А.Н.Комаровским и руководителями комбината.

Придавая исключительное значение созданию промышленного реактора, руководители программы не только назначили нового начальника строительства, но и заменили директора П.Т.Быстрова. Директором комбината 10 июля 1947 г. был назначен Е.П.Славский. Практически одновременно И.В.Курчатов был назначен научным руководителем комбината.

К концу 1947 г. коробка здания первого атомного промышленного реактора была готова и открывался фронт для начала монтажных работ. Начальником объекта А был назначен С.М.Пьянков, а первым главным инженером — В.И.Меркин*, его заместителем стал Н.Д.Степанов. С конца 1948 г. (по 1952 г.) руководителем объекта А был назначен Н.Н.Архипов. Первым научным руководителем объекта был

* В период с 1949 по 1954 г. главными инженерами работали Н.А.Семенов, Г.В.Кругликов, Ф.Е.Логиновский, Ф.Е.Овчинников, возглавлявшие затем руководство другими реакторами комбината..



**БОРИС
ГЛЕБОВИЧ
МУЗРУКОВ**
(1904–1979) —
директор
Уралмаша,
а с 29 ноября 1947 г.
по 16 ноября 1953 г.
комбината № 817,
затем
начальник 4 ГУ
Минсредмаша СССР,
директор КБ-П
(ВНИИЭФ)

начальник сектора № 1 лаборатории № 2 И.С.Панасюк*. Первыми начальниками смен реактора А Специальный комитет назначил Н.Н.Архипова, А.Д.Рыжова, А.И.Забеллина, Л.А.Юровского, Д.С.Пинхасика. Одновременно начальники смен были дежурными главными технологами. Они руководили всеми работами в центральном зале реактора и лично участвовали в них. Реактор укомплектовывался эксплуатационным персоналом, создавались необходимые инженерные службы и лаборатории. Сразу же были назначены руководители служб:

Н.Д.Степанов — заместитель главного инженера, начальник производственной лаборатории;

П.В.Глазков — главный энергетик;

И.А.Садовников — главный механик;

И.М.Розман — руководитель службы дозиметрии;

А.Ф.Попов — руководитель службы КИП;

П.Г.Добия — начальник отделения автоматики;

С.Н.Вьюшкин — руководитель отделения загрузки реактора;

Б.Э.Глезин — руководитель отделения готовой продукции;

Е.Е.Кулиш — начальник физической лаборатории;

В.И.Шевченко — начальник лаборатории дозиметрического контроля.

Большинство из них вместе с эксплуатационным персоналом промышленного реактора прошли подготовку в лаборатории № 2. Руководителями практических занятий с персоналом реактора А были

* Впоследствии научным руководителем эксплуатации всех уран-графитовых промышленных реакторов был назначен В.С.Фурсов, а на реакторе А — Б.Г.Дубовский.

В.С.Фурсов, Н.Ф.Правдюк, И.С.Панасюк, Е.Н.Бабулевич, Г.Н.Флёров, Е.И.Мостовой, Б.Г.Дубовский.

В период подготовки к пуску реактора и его выходу на проектную мощность активно участвовали и обеспечивали работу оборудования, приборов и систем контроля заместители начальников смен Г.В.Кругликов, Ф.Е.Логиновский, Н.А.Семенов, Н.А.Протопопов, В.П.Григорьев и руководители служб. Первыми дежурными физиками на реакторе работали Б.Г.Дубовский, Н.В.Макаров, Г.Б.Померанцев, Ю.И.Корчемкин, В.Н.Мехедов, Н.В.Омельянц. Как отмечает В.И.Меркин, на комбинате было решено организовать небольшой филиал лаборатории № 2 с пусковой группой.

В конце ноября 1947 г. на комбинат вторично приезжал Л.П.Берия и директором комбината был назначен Б.Г.Музруков. Е.П.Славский был переведен главным инженером комбината и работал им до конца 1949 г. В это время по проекту ГСПИ-11 на комбинате выполнялся большой объем строительных работ. На совещании у А.П.Завенягина руководители стройки доложили, что к весне 1948 г. за 1,5 года были выполнены следующие работы [33]: вынуто 190 тыс. м³ грунта, значительную часть которого составляла скальная порода; уложено 82 тыс. м³ бетона и 6 тыс. м³ кирпича. Так как промышленный реактор был важнейшим объектом, М.М.Царевскому и В.А.Сапрыкину указывалось, что строителей по мере окончания работ на реакторе надо постепенно переводить на радиохимический завод, который в конце 1948 г. должен принять облученные в реакторе урановые блоки для выделения плутония [33].

В январе 1948 г. на площадке реактора под наблюдением представителя главного конструктора В.Ф.Гусева начался



**ВАСИЛИЙ
АНДРЕЕВИЧ
САПРЫКИН**
(1890–1954) —
главный
инженер
Управления
строительства
комбината № 817

монтаж металлических конструкций и основного оборудования. К выкладке активной зоны и отражателя из графитовых блоков приступили в марте. В еще не полностью закрытом здании над реакторной зоной был образован воздушный шлюз, не допускающий проникновения одновременно с холодным воздухом пыли и грязи из окружающего помещения. Там еще велись строительные и сварочные работы [11]. На всем протяжении работ по укладке графитовых кирпичей в активную зону реактора физической группой И.С.Панасюка с помощью специальных нейтронных зондов контролировалась чистота графитовой кладки (табл. 5). Наиболее чистые графитовые блоки (минимальный физический индекс) укладывали в центр активной зоны, остальные — в периферийные районы графитовой кладки реактора.

Таблица 5

Сорта графита в активной зоне первого промышленного реактора

Сорт	Физический индекс	Масса графита, т	Средние значения физического индекса
0	До 2,5	62	2,44
I	2,6–2,7	186	2,66
II	2,8–3,0	425	2,95
III	3,1–3,4	680	3,16

К концу мая 1948 г. был закончен основной монтаж и началось опробование механизмов и систем контроля реактора. Практически 5 мес на площадке находился главный конструктор реактора Н.А.Доллежалъ. В течение всего периода монтажа и пуска реактора для оперативности руководства И.В.Курчатов с Б.Л.Ванниковым жили вблизи строящегося объекта. Как вспоминает Б.В.Брохович, в полукilометре от реактора для них был построен трехкомнатный каркасно-засыпной коттедж, отапливаемый дровами. Рядом были караульное помещение и столовая для ИТР. «Домик был взят в зону и охранялся МВД» [41]. Комбинат регулярно посещали А.П.Завенягин, М.Г.Первухин, А.Н.Комаровский, Б.С.Поздняков и другие представители ПГУ и Специального комитета, обеспечивающего контроль за поставкой оборудования. На площадке строящегося реактора Б.Л.Ванниковым с участием И.В.Курчатова и руководителей комбината регулярно проводились оперативные совещания, на которых обсуждался ход работ по строительству объектов и монтажу оборудования. Заместитель начальника ПГУ, А.Н.Комаровский позднее детально осветил, как строились подобные предприятия, подготавливались площадки и коммуникации, как осуществлялось рытье котлованов в твердых грунтах глубиной до 40–50 м.

Особые требования были предъявлены к материалам биологической защиты от радиоактивных излучений реакторных установок. Был разработан и принят для использования тяжелый бетон объемным весом $3,6 \text{ т/м}^3$ с заполнителем из криворожской железной руды (гематита), дробленной до нужных размеров. Частично использовался также бетон на гематитовой руде с добавкой обычного минерального песка [35]. Кроме бетонной защиты реактор имел и внешнюю защиту из баков, заполненных водой слоем 1 м. Эти баки на уран-графитовых реакторах Плутониевого комбината назывались «Леонидами». Другие конструкции реактора тоже зашифровывались. Верхняя биологическая защита (над активной зоной) называлась «Елена», были конструкции с названиями «Ольга», «Роман», «Степан» и др.

Монтаж оборудования и конструкции реактора осуществляли следующие организации:

СМУ-21 «Стальконструкция» (руководители М.Н.Гринберг, Г.А.Маранц);

СМУ-11 «Союзпромонтаж» (руководители Е.А.Николаевский, Е.П.Федотенко, П.А.Герасименко);

ПМУ-71 «Уралэлектромонтаж» (руководители Б.В.Бакин, будущий министр монтажных и специальных строительных работ СССР, А.М.Гнесин);

СМУ «Теплоконтроль» (руководители М.Е.Раковский, В.Г.Литвиненко);

СМУ «Уралсантехмонтаж» (руководители Б.Н.Янишевский, Б.Я.Куколев, Н.К.Смазнов);

институт «Проектстальконструкция» (директор Н.П.Мельников, будущий академик АН СССР).

Как следует из воспоминаний ветерана комбината В.И.Шевченко, на реакторе было смонтировано [42]: 1400 т металлоконструкций и 3500 т оборудования; 230 км трубопроводов разного диаметра; 165 км электрического кабеля; 5745 единиц запорно-регулирующей арматуры; 3800 приборов.

Уже в 1947 г. была создана Центральная заводская лаборатория (ЦЗЛ), сотрудники которой не только занимались совершенствованием технологических процессов действующих объектов, но и проводили научные исследования на уровне ведущих головных институтов отрасли. Первыми руководителями лаборатории были П.А.Мещеряков (с 1947 г. по 10 января 1951 г.), В.П.Шведов (по 14 февраля 1952 г.), В.И.Широков (по 16 июня 1955 г.). В составе ЦЗЛ была служба контроля производства и автоматики (в будущем КИПиА с ОКБ), руководимая Ю.Н.Герулайтисом и С.Н.Работновым, а также радиобиологический отдел, возглавляемый Г.Д.Байсо-

головым и В.К. Лембергом. В здании реактора и в ЦЗЛ находились рабочие кабинеты И.В. Курчатова. Подбор критической массы урана, чистота графита и конструкционных материалов, автоматизация управления процессами, конструкция механизмов сброса блоков, захоронение радиоактивных отходов, радиационная защита персонала — вот далеко не полный перечень проблем, которые решались на месте под руководством и при непосредственном участии И.В. Курчатова [11]. Как отмечал директор комбината Б.Г. Музруков, по личному указанию И.В. Курчатова на объекте начали строить лабораторные корпуса, в которых разместились физическая и радиохимическая лаборатории. К исследованиям в указанных лабораториях были подключены инженеры-исследователи ЦЗЛ и объекта А: Е.А. Доильницын, Е.Е. Кулиш, В.Н. Нефедов, Г.Б. Померанцев, Ю.И. Корчемкин, В.И. Клименков, Г.М. Драбкин, А.Г. Ланин и др.

В начале июня 1948 г. после установки в графитовую кладку ТК была проверена система теплосъема: насосы, подача и прохождение воды по всем ТК и водоводам, включая сброс воды в промышленное озеро. После этого началась круглосуточная загрузка урановых блоков.

Дисциплина на всех участках работы была строжайшая. Контроль за ходом загрузки урана в активную зону реактора осуществлял лично Б.Л. Ванников, и его рабочее место было в центральном зале реактора. Правильность загрузки блоков проверялась специальным лотиком, опускаемым в ТК. Однажды проверяющий правильность загрузки заместитель начальника смены Ф.Е. Логиновский, опуская лотик в канал, упустил вместе с ним трос, к которому был подвешен лотик. Б.Л. Ванников отобрал у Ф.Е. Логиновского пропуск, предупредив, что если не извлечет трос, то не только не получит свой пропуск, но и вообще останется в зоне вместе с заключенными. Специальным приспособлением трос извлекли из канала, обеспечив работоспособность реактора. Строгость, иногда проявляющаяся в шуточной форме, была характерна для Б.Л. Ванникова. Так, за неудачный доклад и ошибки, допущенные при монтаже оборудования, был наказан сотрудник одной из монтажных организаций Абрамзон. Начальник ПГУ, отобрав у него пропуск, со словами «Ты не Абрамзон, а Абрам в зоне» перевел его временно для проживания в лагерь заключенных, находившийся рядом со строящимся объектом. Тогда вся строительная площадка была своеобразным лагерем...

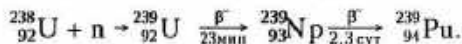
Трудоемкая операция загрузки урановых блоков в тысячу ТК была проведена с особой тщательностью. В первой бригаде в загрузке блоков принимали участие Б.Л. Ванников, И.В. Курчатов и руководители завода. Надежная работа СУЗ, контроль расхода воды в ТК и температуры, нормальные дозиметрические характеристики в помещениях являлись необходимыми условиями пуска реактора.

За параметрами, контролирующими начало цепной реакции, с помощью пусковой аппаратуры непрерывно вели контроль физики под руководством И.С.Панасюка. Вечером 7 июня 1948 г. И.В.Курчатов, взявший на себя функции главного оператора пульта управления реактором, в присутствии Б.Л.Ванникова, руководства завода, начальника смены и дежурных инженеров начал эксперимент по физическому пуску реактора без теплосъема, при извлеченных из активной зоны регулирующих стержнях. В 0 ч 30 мин 8 июня 1948 г. реактор достиг мощности 10 кВт, после чего И.В.Курчатов заглушил цепную реакцию деления ядер урана.

Следующим этапом был пуск реактора в присутствии воды в ТК, который занял примерно 2 сут. После подачи охлаждающей воды стало ясно, что для работы реактора недостаточно урана. Цепная реакция даже при извлеченных стержнях — поглотителях нейтронов не наступала. Для пуска реактора с водой в ТК пришлось порциями, с перерывами загружать дополнительные урановые блоки. Лишь после загрузки пятой порции урана, то есть увеличения проектной загрузки примерно на 20%, реактор с водой достиг критического состояния, когда было извлечено только $\frac{2}{3}$ последнего регулирующего стержня. Это произошло 10 июня в 20 ч. В тот же день мощность реактора с водой была доведена до 1 МВт, и в течение суток реактор работал на этой мощности. 17 июня 1948 г. в оперативном журнале начальников смен появилась особо тревожная запись И.В.Курчатова [42], указывающая на исключительную ответственность обслуживающего реактор персонала: «Начальникам смен! Предупреждаю, что в случае остановки подачи воды будет взрыв, поэтому ни при каких обстоятельствах не должна быть прекращена подача воды. В крайнем случае может быть остановлена вода рабочего хода. Вода холостого хода должна подаваться всегда. Необходимо следить за уровнем воды в аварийных баках и за работой насосных станций».

19 июня в 12 ч 45 мин завершился длительный период подготовки реактора к работе на проектной мощности, которая равнялась 100 МВт [7]. С этой датой связывают начало производственной деятельности комбината № 817 в Челябинске-40. Начались непрерывная, круглосуточная работа объекта и постоянный учет выработанной реактором энергии и нарабатываемого в нем плутония для первой атомной бомбы. Естественно, что тогда количественные данные были известны только узкому кругу лиц. Точность же оценок накапливаемого в реакторе плутония не могла быть высокой, так как в то время еще изучались сечения взаимодействия нейтронов различных энергий с ядрами ^{238}U , из которого получался ^{239}Pu . Кроме того, нужно было знать сечения взаимодействия с нейтронами как ^{235}U , так и ^{239}Pu . В реакторе средняя энергия тепловых нейтронов составляет 0,025 эВ. На рис. 5 и 6 для нейтронов с энергией от 0,01 эВ и выше

приведены сечения их взаимодействия с ядрами ^{235}U и ^{239}Pu . Нарбатываемый плутоний в реакторе делился под действием нейтронов. Часть плутония переходила в другие изотопы по реакции



При реакции $^{239}_{94}\text{Pu} + n$ образуется ~70% продуктов деления, а ~30% переходит в $^{240}_{94}\text{Pu}$.

$\sigma_t, \text{б}$

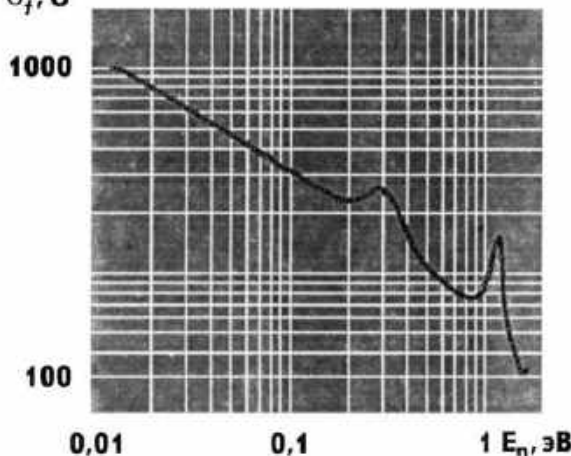


Рис.5. Полное сечение ^{235}U

$\sigma_t, \text{б}$

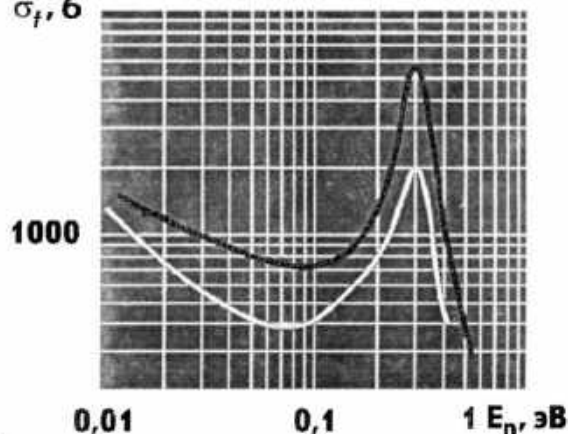


Рис.6. Полное сечение ^{239}Pu и сечение деления

В инструкциях по накоплению плутония строго оговаривалось предельное количество примеси ^{240}Pu в ^{239}Pu .

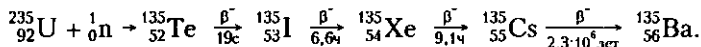
Теоретически рассчитать наработку плутония в реакторе можно было только приближенно. Его количество экспериментально уточнялось в течение нескольких лет на радиохимическом заводе. Учитывая, что ^{239}Np имеет период полураспада 2,3 сут, перед передачей облученного в реакторе А урана на радиохимический завод в бассейнах при реакторе в первые годы работы урановые блоки выдерживали в течение 10–20 периодов полураспада ^{239}Np , пока весь нептуний не перейдет в плутоний. При этом многократно снижалась суммарная радиоактивность, накопленная в урановых блоках. На радиохимическом заводе тоже были созданы емкости выдержки раствора с ураном и плутонием для дополнительного распада ^{239}Np [43].

Трудности эксплуатации первого промышленного реактора

Физические процессы, происходящие в реакторе, связаны с поддержанием управляемой цепной ядерной реакции как при работе на номинальной проектной мощности, так и после остановки реактора. Обычно при остановке мощность не снижается до нуля — цепной процесс не «заглушается», а реактор кратковременно работает на 0,5–1% номинальной мощности. Причины остановок реактора исчисляются десятками и связаны они, как правило, с ликвидацией и исправлением различных отклонений от заданного технологического режима эксплуатации. Много было в начальный период и ложных срабатываний аварийной защиты. Все эти остановки длительностью 20–60 мин снижали выработку реактором плутония, и о них постоянно докладывали руководству комбината и ПГУ.

Для эксплуатационного персонала реактора, особенно начальника смены и старшего инженера управления реактором, подъем мощности с 1%-й или с нулевой до номинала является ответственной технологической операцией. Если вовремя не вывести кратковременно остановленный реактор на заданную мощность, в нем может прекратиться цепной процесс и иногда нужно более суток ждать возможности пуска реактора и обеспечения проектной мощности для наработки плутония. Почему же прекращается цепной процесс деления ядер в реакторе? В результате деления ядер урана и плутония возникают различные продукты деления, имеющие порой огромные сечения поглощения нейтронов. Захват нейтронов ядрами долгоживущих и стабильных изотопов, по установившейся терминологии, называют зашлаковыванием, а короткоживущими радиоактивными ядрами — отравлением. Практически отравление обусловлено поглощением нейтронов только одним изотопом — ^{135}Xe , который обладает сечением поглощения около $3 \cdot 10^6$ б. Это в тысячи раз больше, чем погло-

шение нейтронов ядрами ^{235}U . Позднее было выяснено, что примерно 95% ядер ^{135}Xe возникает не непосредственно при делении, а в результате β -распада другого короткоживущего изотопа — ^{135}I . Этот процесс образования ^{135}Xe после деления урана и его радиоактивного распада происходит по следующей схеме:



В стационарном режиме работы реактора на номинальной мощности соотношение между изотопами ^{135}I и ^{135}Xe — установившееся. При снижении мощности или полном заглушении процесса из ^{135}I , имеющего очень малое сечение поглощения нейтронов, начинает интенсивно образовываться ^{135}Xe . Распадается же он, как видно из схемы, за существенно большее время. Чтобы ^{135}Xe осталось не больше, чем в работающем до этого на номинальной мощности реакторе, нужно значительное время. Это время, называемое «глубиной иодной ямы», зависит от исходной плотности потока нейтронов и с ее ростом увеличивается. Продолжительность нахождения реактора в иодной яме, т.е. в состоянии, когда $K_{\text{эф}} < 1$, определяется несколькими периодами полураспада ^{135}Xe . Поэтому, не успев за кратковременную остановку (≤ 1 ч) устранить на реакторе техническую неисправность, отравление ксеноном заставит самопроизвольно прекратить цепную ядерную реакцию, и реактор на одни сутки и даже более будет иметь нулевую мощность. О таких остановках, по действовавшим тогда приказам, сообщалось в ПГУ, и, как правило, проводилось комиссионное рассмотрение ошибок персонала или неоперативное принятие мер по управлению реактором. Виновных наказывали. Процесс отравления реактора ксеноном, когда реактор на тепловых нейтронах останавливался на целые сутки, и сейчас называется «свалиться в иодную яму». Эта иодная яма в то время была своеобразным дамокловым мечом не только для руководителей смены, но и для дирекции объекта, так как ежемесячная выработка плутония снижалась на 3–5% даже при единичной остановке.

Процесс зашлаковывания, уменьшающий размножающую способность реактора, не вносит существенных изменений в режим его эксплуатации. Однако он ограничивает длительность использования в активной зоне исходной загрузки урана, поскольку тоже увеличивает вредное поглощение нейтронов продуктами деления. Наибольшее поглощение нейтронов имеют изотопы самария и гадолиния. Так, у ядер ^{149}Sm сечение поглощения примерно 74,5 тыс., а у ^{157}Gd примерно 200 тыс. б.

Однако в начальный период работы главные трудности были связаны не только с физическими параметрами реактора. Непрерывная работа реактора требовала надежных СУЗ, безотказной работы

приборов контроля температуры и расходов воды в каждом ТК. В зависимости от распределения мощности по радиусу и высоте активной зоны тепловые нагрузки на урановые блоки сильно различались. Для различных зон реактора устанавливались свои пределы срабатывания СРВ и ПРВ от аварийной защиты по сигналам. Заглушение реактора происходило при недопустимой динамике изменений расхода воды, охлаждающей урановые блоки. Коррозия алюминиевых труб в ТК и оболочек урановых блоков, а также их эрозионный размыв приводили к другим неприятностям, связанным с появлением в воде радиоактивности. Попадание воды в графитовую кладку через разрушенные трубы вызывало необходимость замены каналов и перегрузки урановых блоков. Влага в графите изменяла его физические свойства, и при сильном «замачивании» графитовой кладки в реакторе могла просто прекратиться цепная ядерная реакция. Графит в таком случае надо было сушить, а процедура эта требовала много времени, так как продувка графита проводилась только через небольшие зазоры между графитом и ТК (диаметр отверстий в графите был 44 мм, а канала 43 мм). Реактор в это время не работал.

Со всеми этими непредвиденными трудностями столкнулись в первый же год. Были также радиационные аварии, связанные с образованием так называемых «козлов», когда разрушенные по разным причинам урановые блоки спекались с графитом. Такая авария произошла в первые сутки работы реактора на проектной мощности. 19 июня 1948 г. на площадке влагосигнализации начальником лаборатории В.И.Шевченко была зарегистрирована повышенная радиоактивность воздуха (около 300 доз). Было выяснено, что в ячейке 17-20 из-за приоткрытия клапана холодного хода в ТК был мал расход охлаждающей урановые блоки воды. Реактор был остановлен, и до 30 июня проводилась очистка ячейки от разрушенных — сплавленных (частично) с графитом урановых блоков. Все это время Специальный комитет и руководители ПГУ требовали наработки плутония. Подробности ликвидации этой аварии изложены в публикациях [42, 44]. 25 июля в смену Н.Н.Архипова (заместитель начальника смены — Н.А.Семенов) после появления сигнала СРВ в ячейке 28-18 «сделали» второго «козла». Реактор надо было остановить и полностью прекратить наработку плутония. Однако было принято решение ликвидировать «козла» на работающем реакторе, что приводило к загрязнению помещений и переоблучению сменного персонала. При этом для охлаждения режущего инструмента, снижения выброса в центральный зал аэрозолей и пыли с ураном и графитом в ячейку 28-18 подавалась вода. Происходило замачивание графитовой кладки, что вызвало коррозию ТК.

На реакторе А были впервые обнаружены такие эффекты, как распухание урана и графита под действием нейтронов. Они изуча-



**ВЛАДИМИР
ИОСИФОВИЧ
МЕРКИН** –
руководитель
сектора № 6
лаборатории № 2,
первый главный
инженер
реактора

лись с участием работников ЦЗЛ комбината А.Г.Ланина, И.Т.Березюка, В.И.Клименкова и др., а также ученых под личным руководством И.В.Курчатова, Р.С.Амбарцумяна, А.А.Бочвара, С.Т.Конобеевского и др.

Особо сложной оказалась проблема, связанная с ограниченным количеством природного урана, так как горнодобывающая урановая промышленность только начинала развиваться. Как известно, при первой загрузке промышленного реактора использовался даже уран, вывезенный после войны из Германии. Как отмечал Ю.Б.Харитон, «в 1945 г. в Германию была послана комиссия. Возглавлял ее Завсняягин... Вместе с Киконным мы начали искать уран в Германии... На границе с американской зоной нам все-таки удалось обнаружить около 100 т урана. Это позволило нам сократить создание первого промышленного реактора на год» [29]. Однако этого урана было недостаточно для загрузок реактора Ф-1 и промышленного реактора, поэтому уже в 1948 г. использовался частично и отечественный уран, который добывали в Средней Азии.

В установленных в реакторе алюминиевых каналах в первой загрузке не была анодирована поверхность труб. При попадании воды в графитовую кладку из-за контакта графит – вода – алюминий возник интенсивный коррозионный процесс, и уже в конце 1948 г. началась массовая протечка труб, замачивание графитовой кладки. Эксплуатировать реактор с этими трубами стало невозможно. 20 января 1949 г. реактор был остановлен на капитальный ремонт [42]. Возникла сложнейшая проблема, как заменить такие каналы и сохранить все ценные урановые блоки. Можно было разгрузить урановые блоки через сконструированную систему разгрузки. Однако их прохождение вниз

по технологическому тракту (канал-шахта разгрузки-кюбель-бассейн выдержки) привело бы к механическим повреждениям оболочек блоков, не допускающим повторную загрузку их в реактор. А запасной загрузки урана в то время не было. Нужно было сохранить уже частично облученные и сильно радиоактивные урановые блоки. По предложению А.П.Завенягина делалась попытка извлечь разрушенные в реакторе трубы и, оставив в графитовых трактах урановые блоки, поставить новые, анодированные трубы. Это оказалось невозможным, так как при извлечении разрушенных труб, которые имели для центровки урановых блоков внутренние ребра, центровка столба блоков нарушалась — блоки смещались к стенкам графитовых кирпичей. Работниками службы главного механика реактора были разработаны приспособления, позволяющие специальными «присосками» из разрушенных технологических труб извлекать урановые блоки через верх в центральный зал реактора. Без переоблучения участников этой операции обойтись было нельзя. Надо было делать выбор: либо остановить реактор на длительный период, который Ю.Б.Харитон оценивал в один год, либо спасти урановую загрузку и сократить потери в наработке плутония. Руководством ПГУ и научным руководителем было принято второе решение. Урановые блоки извлекали «присосками» через верх реактора с привлечением к этой «грязной» операции всего мужского персонала объекта. Урановые блоки из разрушенных ТК должны были затем частично использовать для повторной загрузки в новые трубы из алюминиевого сплава с защитным анодированным покрытием.



**ВАЛЕРИЙ
ФЕДОРОВИЧ
КАЛИНИН —**

первый
ученый секретарь
секции
ядерных реакторов
Инженерно-
технического
совета
Специального
комитета,
переводчик книги
Г.Д.Смита.
С 1968 г. работает
в ЦНИИатоминформе

* Емкость для транспортировки выгруженных из реактора урановых блоков в бассейн с водой.

После извлечения из реактора урановых блоков залитую водой («замоченную») графитовую кладку необходимо было сушить и только затем ставить новые каналы и загружать в них урановые блоки. Всего было извлечено 39 тыс. урановых блоков [42]. Работавший тогда главным инженером комбината Е.П.Славский, вспоминая эту аварийную разгрузку реактора, отмечал, что попадание воды в зазор труба—графит было связано и с неудачно выбранной системой влагосигнализации: «Чтобы изменить эту систему, потребовалось разгрузить весь реактор. ... Эта эпопея была чудовищная». И.В.Курчатов в то время получил большую дозу облучения, так как в центральном зале около его рабочего стола находились облученные урановые блоки и он их осматривал. Е.П.Славский писал: «Если бы досидел, пока бы все отсортировал, еще тогда он мог погибнуть» [40]. Причины этой аварии рассматривались у руководителя Специального комитета Л.П.Берии, где ответ держали И.В.Курчатов, Б.Л.Ванников, М.В.Хруничев^{*} и другие ответственные за работу реактора и обеспечение его технологическими трубами и урановыми блоками. Оправдаться было очень сложно, и наказание могло быть непредсказуемым. Вернувшись на комбинат, И.В.Курчатов написал Л.П.Берии: «В дополнение к нашему предыдущему сообщению докладываем: к 1 февраля мы закончили сушку агрегата и достигли равномерного распределения температур по его сечению. Выделение конденсата прекратилось...» [44]. 26 марта 1949 г. был начат вывод реактора на мощность.

Другая серия неприятностей, приводивших к переоблучению персонала и остановкам реактора, была связана с работами по ликвидации «козлов» и очистке графитовых ячеек от последствий обрыва ТК при зависаниях урановых блоков. Зависания происходили по разным причинам. При нарушении герметичности оболочки блока продукты коррозии урана забивали зазор между блоками и стенками трубы, сильно снижая расход воды через ТК. Система СРВ позволяла в большинстве случаев предупредить сильное зависание блоков в трубе и давала возможность без обрыва трубы специальной «пешней» пробить столб блоков (выше зависшего) в шахту разгрузки. Иногда происходили обрывы труб и урановые блоки оставались без охлаждения в графитовой кладке. Реактор не работал, пока специальным инструментом уран не удаляли из графитовой ячейки. Технологическая операция пробивки вручную «пешней» зависших в ТК блоков была очень деликатной. Вот как писал об этом инженер-физик объекта С.В.Мельников:

Если он у Вас завис,
Пробивайте его вниз.
Очень сильно не стучите
И канал не оборвите.

* Министр авиационной промышленности.

Если происходил обрыв ТК, то реактор, как правило, сваливался в иодную яму и его простой исчислялся десятками часов. За кратковременную остановку извлечь зависшие урановые блоки, оставшиеся в графите, было невозможно, даже с использованием прогрессивных разработок, включая цангу Г.В.Кругликова, позволяющую сразу извлекать по несколько блоков [41]. Позднее учеными была установлена и другая причина зависания блоков — распухание уранового сердечника под действием нейтронного облучения. В отдельных загрузках урана в реакторе происходили массовые зависания, что заставляло досрочно разгружать урановые блоки. Эти две причины зависания блоков в каналах указывали на серьезные задачи, стоящие перед институтами. Необходимо было разработать новые урановые сердечники, новые сплавы алюминия для оболочек блоков и ТК, а также совершенствовать технологические процессы на заводах — изготовителях этой продукции. Комиссия (А.П.Александров, Р.С.Амбарцумян, В.В.Гончаров, В.И.Меркин и др.) под руководством И.В.Курчатова поручила ВИАМу и НИИ-9 разобраться в причинах распухания и дать рекомендации по его сокращению. Благодаря изменению режима термической обработки урановых стержней работниками указанных институтов (А.М.Глухов, А.А.Бочвар, Г.Я.Сергеев, В.В.Титова и др.) завод № 12 в начале 1949 г. стал поставлять более стойкие урановые блоки.

Отклонений от нормального технологического режима работы реактора было много. Это и заклинивания кубеля с облученными блоками в разгрузочной шахте, и попадание в технологические тракты различных деталей. В одну из смен (начальник — Д.С.Пинхасик) после пробивки зависших блоков в технологический тракт упустили составную «пешню» — металлический стержень длиной >25 м, диаметром 32 мм, что вызвало много непредвиденных работ в тяжелых условиях. При подготовке к передаче на радиохимический завод урановые блоки сортировали, то есть отделяли от холостых — алюминиевых блоков, загружаемых в ТК ниже активной зоны. В каждом кубеле, выгружаемом из шахты разгрузки с урановыми блоками, находилось около 40% холостых блоков. Специальными приспособлениями под водой эти блоки рассортировывали. Затем в специальных вагонах-контейнерах урановые блоки железнодорожным транспортом перевозили на радиохимическую переработку. Холостые блоки, изготовленные из «авиала», отправляли в специальные могильники. Аварийные ситуации иногда возникали и при этих операциях.

При ликвидации отдельных аварий персонал получал недопустимо большие дозы радиации. Особенно опасно было заклинивание урановых блоков в кубелях, извлекаемых из разгрузочной шахты. Иногда последствия таких работ были трагическими. Недолго про-

жил сварщик П.С.Пронин, о чем известно ветеранам, работавшим тогда на реакторе А (Ф.Я.Овчинников, Н.И.Козлов, Л.А.Алехин и др.). Как показано в табл. 6, в 1949 г. >30% работавших на промышленном реакторе получили годовую дозу облучения 100–400 бэр, а некоторые даже выше.

Таблица 6

Дозы облучения персонала промышленного ядерного реактора в первые годы эксплуатации [44], %

Год	Средняя доза, бэр				Средняя доза по объекту, бэр/год
	25	25—100	100—400	400	
1948	84,1	11,1	4,8	—	19,6
1949	10,7	57,7	31,1	0,5	93,6
1950	52,2	47,2	0,6	—	30,7
1951	74,9	25,1	—	—	18,1
1952	83,9	16,1	—	—	14,9
1953	79,3	18,4	2,3	—	19,6
1954	97,0	3,0	—	—	8,9
1955	95,5	4,5	—	—	9,5
1956	98,7*	0,6	0,7	—	5,1
1957	100,0*	—	—	—	4,2
1958	100,0*	—	—	—	4,4
1959	100,0*	—	—	—	3,3

* После 1956 г. >90% работающих получали дозу <10 бэр/год.

Работы, связанные с распуханием графита и ликвидацией последствий зависания блоков, привели к неизбежности проведения калибровки графитовых ячеек и даже их рассверловки специально разработанными штангами и фрезами. Указанные работы проводились на реакторе сменным персоналом и сотрудниками ЦЗЛ комбината В.И.Клименковым, А.И.Маловым, Ю.К.Шуруповым и др. Возникла необходимость учета проведенных работ в каждой графитовой ячейке. Была введена система ведения истории графитовых ячеек и работы ТК. Она выполнялась специальной группой ведения учета работы реактора, в которой в течение нескольких лет работали Г.Б.Померанцев — будущий член-корреспондент Казахской АН и Ю.И. Корчемкин — талантливый физик-теоретик.

Эксплуатация реактора в течение нескольких лет выявила массу недостатков в системах контроля технологического процесса, который непрерывно совершенствовался. Так, измерение расхода воды в более чем 1000 ТК осуществлялось индивидуальными расходомерами, содержащими ртуть. При их замене и ремонте ртуть разлива-

лась, загрязняя помещения. Были разработаны, изготовлены и смонтированы другие расходомеры, без ртути.

В первые годы графитовая кладка реактора продувалась воздухом. Из-за горючести графита температуру графитовой кладки при этом нельзя было поднимать $>330^{\circ}\text{C}$. (При работе на проектной мощности 100 МВт максимальная температура в графитовой кладке ограничивалась 220°C .) Это ограничивало допустимую мощность реактора, а следовательно, и его способность производить оружейный плутоний. После строительства азотной станции замена воздуха на азот позволила повысить температуру графита и в несколько раз увеличить мощность реактора. При этом были увеличены и расход охлаждающей реактор воды, и температура воды на выходе из ТК. Условия же работы по дозам облучения были приведены в норму только через 8–10 лет.

Промышленный реактор – первая исследовательская база

Начало регулярного выпуска радиоактивных изотопов для народного хозяйства и медицины практически совпадает с началом работы промышленного реактора на проектной мощности. Использование радиоактивных изотопов, особенно в медицине, еще в 1946 г. находилось под научным руководством Радиационной лаборатории. Постановлениями Совета Министров СССР от 10 июля 1948 г. и АМН от 21 сентября 1948 г. этой лаборатории были поручены изучение воздействия радиации на человека и разработка применения радиоактивных источников в медицине и народном хозяйстве. После Г.М. Франка этот ведущий научный центр страны возглавляли крупнейшие ученые-академики: А.В.Лебединский (1954–1962 гг.), П.Д. Горизонтов (1962–1969 гг.), а с 1969 г. институтом бессменно руководит академик АМН Л.А.Ильин.

Начало вывода промышленного ядерного реактора на проектную мощность в 1948 г. совпало с организацией в Институте биофизики специальной препаративной лаборатории. Работающая на сырье (облучаемых мишенях), облученном нейтронами в ядерных реакторах или заряженными частицами на ускорителях, уже имевшихся в то время в ИАНе, лаборатории № 2, ЛФТИ и ХФТИ, препаративная лаборатория поставляла радиоактивные изотопы разным учреждениям страны.

В активной зоне промышленного реактора с учетом неравномерного распределения мощности плотность потока тепловых нейтронов достигала 10^{12} – 10^{13} $\text{c}^{-1}\cdot\text{см}^{-2}$. При таких высоких для того времени плотностях потока нейтронов в отведенные каналы вместо урановых блоков могли загружаться специально изготовленные блоки-мишени с исходными стабильными изотопами, которые за короткий срок под

действием нейтронов превращались в радиоактивные элементы. По инициативе И.В.Курчатова уже в первые годы работы реактора были выделены отдельные ячейки для получения ^{60}Co , ^{210}Po , ^{32}P , ^{36}Cl , ^{14}C и некоторых других радионуклидов. Естественно, в промышленном реакторе не могли нарабатываться изотопы с малым периодом полураспада, которые затем следовало передавать в препаративную лабораторию. За время перевозок такие изотопы распадались, однако по заказу медиков в урановых блоках нарабатывался короткоживущий изотоп ^{131}I , при этом время облучения блоков в реакторе сокращалось в несколько раз, а их растворение проводилось на радиохимическом заводе. Реакторный метод получения радиоактивных изотопов, налаженный с вводом в действие реактора А, продолжает оставаться основным способом получения радионуклидов. Так, на Второй женевской конференции (1958 г.) отмечалось, что из 110 выпускаемых радиоактивных изотопов 92 получают в реакторах.

Как известно, скорость наработки — интенсивность производства плутония или других радионуклидов зависит от плотности нейтронных потоков. Кроме реактора А в то время в стране не было подобного источника нейтронов. Поэтому на реакторе по указанию И.В.Курчатова с 1949 г. начали проводить различные физические измерения, включая измерения сечений взаимодействия нейтронов с различными изотопами, а также продолжение исследований по открытой еще до войны под его руководством ядерной изомерии. В центральном зале реактора появилась специальная установка — селектор нейтронов, на которой работники комбината Е.А.Доильницын, Е.Е.Кулиш, Г.М.Драбкин, В.Н.Нефедов и другие сотрудники ЦЗЛ комбината вместе с сотрудниками лаборатории № 2 проводили необходимые измерения. Позднее для наработки изотопов и физических исследований были построены специальные ядерные реакторы.

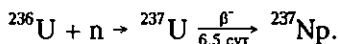
Любое увеличение числа ячеек, загружаемых мишенями для наработки изотопов, приводит к уменьшению числа ТК, загружаемых ураном. Ухудшаются физические параметры реактора, уменьшаются коэффициент размножения нейтронов и выработка плутония. При этом в ТК несколько возрастает энергонапряженность урановых блоков, что увеличивает энергию нейтронов и, как видно из рис. 5 и 6, в определенных диапазонах энергии (около 0,3 эВ) сильно изменяет их взаимодействие как с ^{235}U , так и с ^{239}Pu . В зависимости от энергии нейтронов в реакторах сечение взаимодействия нейтронов с ^{239}Pu изменяется в 5–8 раз. Поэтому любое увеличение мощности как отдельного ТК, так и реактора в целом изменяет скорость не только накопления плутония, но и его выгорания, как за счет деления ^{239}Pu , так и за счет превращения его в более тяжелые и вредные изотопы плутония, отрицательно влияющие на делящиеся свойства ядерной взрывчатки. Разница полного сечения и сечения деления ^{239}Pu ($\sigma_t - \sigma_f$) и определяет скорость накопления в реакторе ненужного,

балластного изотопа ^{240}Pu . Избежать наработки ^{240}Pu практически нельзя, поэтому в промышленном реакторе длительность облучения ^{238}U ограничивалась малыми сроками (несколько месяцев).

Энергия, выделяемая в реакторе, равна в основном энергии, выделяемой при делении ^{235}U и ^{239}Pu . Основная часть энергии отводится теплоносителем, а несколько процентов энергии деления с долгоживущими осколками передается с урановыми блоками на радиохимический завод. По опубликованным данным, полная энергия деления одного ядра распределяется следующим образом, МэВ:

Кинетическая энергия осколков деления	162
Энергия мгновенного γ -излучения	6
Энергия β -распада осколков деления	5
Энергия γ -излучения осколков деления	5
Кинетическая энергия нейтронов, возникающих при делении	6
Энергия, уносимая нейтрино (в реакторе не выделяется)	11
Общая энергия без нейтрино	184

^{235}U не только делится под действием тепловых нейтронов, примерно 16% его по реакции захвата нейтрона $^{235}\text{U} + n \rightarrow ^{236}\text{U}$ переходит в долгоживущий изотоп ^{236}U с периодом полураспада приблизительно $2,5 \cdot 10^7$ лет. Нарбатываемый в реакторе ^{236}U служит хорошим исходным сырьем для получения долгоживущего изотопа нептуния. Он получается по известной ядерной реакции



В отличие от короткоживущего ^{239}Np , который в бассейнах выдержки урановых блоков до поступления на радиохимический завод практически полностью перейдет в ^{239}Pu , долгоживущий ^{237}Np ($T_{1/2} \sim 2 \cdot 10^6$ лет) всегда будет находиться в облученном уране и от него при соответствующих требованиях необходимо очищать ^{239}Pu .

Известно, что для получения 1 Вт·с энергии необходимо, чтобы разделилось $3,1 \cdot 10^{10}$ ядер. Энергия 1 МВт·сут выделяется при делении 1,1 г ^{235}U . Количество израсходованного урана при этом выше за счет реакции захвата нейтронов и составляет 1,31 г. Количество нарабатываемых в реакторе радиоактивных изотопов будет определяться простой формулой [45]

$$M = 1,31 \frac{A}{235} X W t, \text{ г},$$

где A — атомный номер изотопа; X — удельный выход изотопа; W — мощность реактора, МВт; t — время эффективной работы реактора

на указанной мощности, сут. Количество нарабатываемого в реакторе ^{239}Pu определяется как

$$M = 1,33 X_{\text{Pu}} W t, \text{ г},$$

где X_{Pu} — плутониевый коэффициент, характеризующий отношение нарабатываемого в реакторе плутония к сгоревшему ^{235}U . Для реакторов на тепловых нейтронах, работающих на природном уране, значение X_{Pu} обычно равно 0,7–0,8. Если принять, что $X_{\text{Pu}} = 0,75$, то за сутки при $W = 100$ МВт реактор нарабатывает 100 г плутония. Даже через 3–4 мес непрерывной работы реактора на указанной мощности при загрузке около 150 т урана в 1 т урановых блоков концентрация плутония ничтожно мала (в среднем 60–80 г/т). В центре реактора она выше, а на периферии существенно ниже. При увеличении мощности реактора энергия нейтронов будет возрастать и плутониевый коэффициент X_{Pu} будет изменяться. При определении наработки других радионуклидов в каждой загруженной мишенями ячейке измеряли нейтронные потоки и их сечения взаимодействия с облучаемым материалом.

Для проведения радиобиологических исследований на промышленном реакторе был специально создан биологический канал. Он находился на периферии реактора, на границе с отражателем реактора и имел достаточно большой диаметр, позволяющий размещать в нем подопытных животных*. В зависимости от доз γ - и нейтронного излучений, а также от температуры и времени нахождения животных в канале радиобиологи изучали предельные параметры их жизнестойкости.

Дозовые нагрузки персонала первого промышленного реактора

Одновременно с началом работы реактора А в августе 1948 г. руководством ПГУ и Минздрава СССР были подготовлены Общие санитарные нормы и правила по охране здоровья работающих на объектах Плутониевого комбината. Дневная норма при 6-ч смене устанавливалась в 0,1 бэр, т.е. за год ≤ 30 бэр. В случае аварии этими нормами разрешалось однократное облучение дозой 25 бэр за время ≥ 15 мин [46]. После такого облучения проводилось медицинское обследование работника, а затем ему предоставляли отпуск или работу, исключающую воздействие радиации. Для своевременного медицинского обслуживания производственного персонала постановлением правительства на комбинате был создан медицинский санитарный отдел (МСО-71) со здравпунктами на объектах. Первым начальником МСО-71 был П.И.Моисейцев, работавший до этого

* В радиобиологическом отделе ЦЭЛ был виварий. Впоследствии на базе этого отдела в Челябинске-40 был создан филиал № 1 Института биофизики Минздрава СССР.

начмедом на заводе № 12 в г. Электростали. Позднее при МСО-71 в Челябинске-40 вступила в строй специальная больница № 2, обеспечивающая профилактические осмотры и необходимое лечение.

Дозиметрическая аппаратура предназначалась для контроля мощности экспозиционной дозы γ -излучения. Индивидуальный контроль работников промышленного реактора осуществляли с помощью фотопленочных дозиметров, которые могли регистрировать дозу от 0,05 до 3 бэр с точностью примерно 30%. Проявление пленки должно было проводиться ежедневно. Имея такой фотопленочный дозиметр (в кармане комбинезона), каждый работник знал дозу облучения на все тело. На объекте А была организована служба дозиметрии, руководимая И.М.Розманом, ранее работавшим в лаборатории № 2 над проблемами контроля интенсивности радиации. В Минздраве страны была создана специальная система санитарного и медицинского надзора. Как ранее отмечалось, практически все технологические операции на промышленном реакторе были сопряжены с работой в условиях повышенной радиации. Из недавно опубликованных данных (см.табл. 6) видно, что после начального этапа работы в 1948 г., когда лишь 4,8% работающих получили дозу облучения >100 бэр/год, в 1949 г. радиационная обстановка резко ухудшилась. Ликвидация аварийных ситуаций, в первую очередь при извлечении урановых блоков не по традиционной схеме, обрывы технологических труб при заваривании привели к увеличению воздействия на персонал в среднем до 93,6 бэр/год. Только через 8 лет стабилизировалась радиационная обстановка и превышение среднегодовых доз облучения наблюдалось



Здание промышленного реактора А

лишь у 5% работающих. В 1952 г. был введен новый норматив, ограничивающий дозу облучения за рабочую смену $\leq 0,05$ бэр, или 15 бэр за год. В аварийных ситуациях по-прежнему допускались разовые дозы 25 бэр за время ≥ 15 мин. При таких работах, а также при ремонте оборудования отдельным лицам разрешалась ежегодная доза до 100 бэр. В 1945–1956 гг. был установлен порядок перевода работников по дозиметрическим данным в «чистые» условия на срок 6 мес при суммарном облучении за последний год >45 бэр и >75 бэр за последние 2 года. Только с 1970 г. были введены правила, где годовой уровень облучения не должен был превышать 5 бэр/год. Показатели, характеризующие внешнее γ -облучение производственного персонала за первые 10 лет работы реактора А, приведены в табл. 7.

Таблица 7

Средняя суммарная доза внешнего γ -облучения в различных профессиональных группах промышленного реактора за 1948–1958 гг. [46]

Профессиональная группа	Доза γ -облучения работающих, бэр
Работники службы дозиметрии	107,9
Работники службы КИПиА	128,6
Работники служб механика и энергетика	207,5
Основной персонал центрального зала реактора	203,8

Наибольшее радиационное облучение получали тогда работники служб механика и энергетика, а также основной состав работников центрального зала реактора.

По заключению доктора медицинских наук Н.А.Кошурниковой, ведущего в стране специалиста по радиационной гигиене, увеличение смертности у групп с большими дозами (100 бэр за 10 лет и 25 бэр за год) можно расценивать как результат влияния радиации. Уровень же смертности с меньшими дозами не отличается от онкологической смертности взрослого населения страны, которая составляет 200 случаев на 100 тыс.чел. в год, что за 30 лет составит около 6% (табл. 8).

Таблица 8

Уровень онкологической смертности работающих на промышленном реакторе с 1948 по 1958 г. [47]

Показатель	Суммарная доза, бэр/10 лет (до 1958 г.)		Максимальная доза, бэр/год	
	<100	>100	<25	>25
Уровень онкологической смертности	$5,7 \pm 0,6$	$9,4 \pm 1,2$	$5,9 \pm 0,6$	$8,7 \pm 1,1$

Только у лиц, получивших большие дозы (за год и за 10 лет), этот показатель $>6\%$. При этом у работающих на реакторе частота случаев хронической лучевой болезни составляла 5,8% [47].



Последнее посещение Е.П.Славским первого промышленного ядерного реактора (1985 г.). Слева направо: В.П.Матвеевко, Л.П.Кузнецов и Н.С.Бурдаков (комбинат № 817), В.Г.Шаццло (СвердНИИХиммаш), А.С.Никифоров (ВНИИНМ), А.С.Калмыков (комбинат № 817), А.К.Круглов (НТУ), Ю.Н.Кошкин (ОКБМ), В.Н.Лантес (комбинат № 817), представитель Челябинского обкома КПСС, В.Г.Трепалин (начальник стройки комбината), А.Д.Зверев (4 ГУ), Б.В.Никипелов (комбинат № 817), Л.Т.Житченко (ГСПИ-12), Е.П.Славский (министр), А.Ф.Разжигеев (секретарь горкома КПСС), А.Г. Мешков (первый заместитель министра), Б.В.Брохович, А.И.Бочкарев, Л.И.Хлобынин, В.И.Оснотин и В.В.Макаров (комбинат № 817), А.Г.Александров (7 ГУ), М.П.Никифоров (комбинат № 817).

Более чем 40-летний опыт лечения хронической лучевой болезни в закрытом городе — Челябинске-40* (МСО-71) и филиале № 1 Института биофизики популярно описан в брошюре В.Н.Дощенко [48]. Одним из его выводов был следующий: «Абсолютно неверно говорить о вреде радиации изолированно, оторвано от семи других факторов риска, которые, как показывает практика, далеко опережают радиацию по снижению здоровья современного человека». Имея данные о хронической лучевой болезни 1355 работников ядерных реакторов комбината, часть из которых за 2–4 года получили дозы, превышающие приведенные в табл. 7, В.Н.Дощенко указывает, что у этих больных за все 40 лет наблюдения летальность не превысила 0,2%.

* В настоящее время — Челябинск-65, или Озерск, в котором на 1 января 1990 г. проживало 81,6 тыс. чел.

Военно-политическая задача — в кратчайшие сроки получить делящийся материал для ядерного оружия (оружейный плутоний) — отраслью была выполнена. Сжатые сроки, ограниченное количество исходного материала (природного урана) не позволяли тщательно прорабатывать технологии. Все было впервые. Страна только выходила из войны. Промышленный потенциал был явно недостаточен. Все это приводило к переоблучению персонала.

Первый промышленный уран-графитовый реактор находился в эксплуатации и нарабатывал оружейный плутоний в течение 41 года. Он был окончательно остановлен 16 июня 1987 г. На приведенной фотографии — начало демонтажа здания хранилища облученных урановых блоков. Около здания установлен бюст научного руководителя Уранового проекта И.В.Курчатова.

В 1985 г. Е.П.Славский последний раз посетил комбинат и сфотографировался с группой сотрудников у здания реактора.



Первый радиохимический завод Б

Получение делящихся материалов — главная и самая сложная задача при создании ядерного оружия. Нарботанный в ядерном реакторе плутоний необходимо отделить от урана и высокоактивных продуктов деления. Для выделения плутония был построен радиохимический завод (здание 101), который из режимных соображений назывался заводом Б.

Облученные урановые блоки, очехлованные алюминиевой оболочкой, из реактора А поступали на завод Б. Здесь их растворяли, затем химическими методами отделяли сначала материал оболочки, а потом высокоактивные продукты деления; на последующих стадиях выделяли плутоний из огромного количества урана. Этот плутоний перевозили на химико-металлургический завод В, где из него получали сначала черновой, а затем очищенный металлический плутоний и изделия для атомной бомбы.

Недоиспользованный, или регенерированный, уран тщательно очищали от следов плутония и продуктов деления. Этот уран имел изотопный состав, практически аналогичный природному. Из регенерированного урана в то время предполагалось получать другой вид ядерной взрывчатки — высокообогащенный ^{235}U . Для обогащения ^{235}U в посёлке Верх-Нейвинском строился первый в России газодиффузионный завод (комбинат № 813).

Полученный на заводе Б концентрированный (после отделения от урана и продуктов деления) раствор плутония должен был подвергаться дополнительной очистке от следов примесей, чтобы плутоний имел минимальное γ - и β -излучение при поступлении к металлургам. Все радиохимические процессы для завода Б были разработаны в РИАНе под руководством академика В.Г. Хлопина. Там была создана и другая, более сложная технология. Были уточнены зависимости распределения вещества между различными фазами: жидкость—твёрдая, раствор—раствор, жидкость—газ. Была показана воз-



**ВИТАЛИЙ
ГРИГОРЬЕВИЧ
ХЛОПИН**
(1890–1950) —
академик с 1939 г.,
директор
РИАНа с 1939 по
1950 г.

возможность полного отделения плутония от урана и от продуктов деления [49].

С именем В.Г. Хлопина связано создание отечественной радиохимии, которой он начал заниматься в Радиологической лаборатории, организованной В.И. Вернадским при Петербургской академии наук еще в 1915 г. Под его руководством, как отмечает в своих воспоминаниях наш крупнейший ученый по работе с радиоактивными материалами, ветеран атомной промышленности З.В. Ершова, была организована пробная переработка радиоактивных руд и 1 декабря 1921 г. были получены первые русские радиевые препараты [50]. Он вместе с И.Я. Башиловым организовал работу по получению радия из отечественных руд. В предвоенный период В.Г. Хлопин возглавлял Урановую комиссию, которая уже тогда наметила предварительную программу получения обогащенного ^{235}U и использования энергии деления ядер. Своей одержимостью и настойчивостью В.Г. Хлопин напоминал первооткрывателей радиоактивных элементов. Он использовал весь опыт работы, приобретенный Марией и Пьером Кюри при извлечении радия из радиоактивных руд. Получению и использованию радиоактивных элементов были посвящены многие публикации В.Г. Хлопина, в том числе публикация в 1947 г. краткого очерка истории развития радиевого дела в России.

Под научным руководством В.Г. Хлопина и И.Я. Башилова в Москве на Заводе редких металлов (1929–1930 гг.) была организована переработка урановых руд. В конце 1931 г. при переработке сотен тонн урана было получено 200 мг радия в виде смешанного бромида радия и бария. Паспорт на ампулы с радием в РИАНе сверялся с Международным эталоном Венского радиевого ин-

ститута и в первые годы подписывался самим В.Г. Хлопиным. Урановая руда добывалась на Тюя-муонском месторождении, а после его истощения и из-за отсутствия разведанных запасов урановых руд в 1936 г. производство радия в Москве прекратилось.

Таким образом, РИАН был практически единственным институтом в стране, способным организовать выделение плутония из высокорadioактивных материалов и очистить от радионуклидов уран в промышленных масштабах. Именно этому коллективу, имеющему в своем составе высококвалифицированных радиохимиков, физиков, радиометристов и других специалистов, работающих с радиоактивными материалами, в 1944 г. и было поручено создать технологию радиохимического производства. Академик В.Г. Хлопин был назначен научным руководителем.

В 1944–1945 гг. в РИАНе (после возвращения из эвакуации) восстановили циклотрон и начали проводить первые радиохимические исследования на облученном уране с «импульсными» небольшими количествами нептуния и плутония. В 1945–1946 гг. вышел первый научно-технологический отчет по способу переработки облученного урана. Технология, предложенная РИАНом, была вначале проверена на близком химическом аналоге плутония – короткоживущем изотопе нептуния ^{239}Np , период полураспада которого составляет примерно 2,3 сут. Этот имитатор плутония позволял регистрировать радиометрически и микроколичества элемента в растворах. Эта работа свидетельствовала о высоком классе школы отечественных радиохимиков, созданной В.Г. Хлопиным и его воспитанниками. Среди них ведущее место занимали Б.А. Никитин, А.П. Ратнер, В.И. Гребенщикова, И.Е. Старик, К.А. Петржак, В.М. Вдовенко, а также соратники В.Г. Хлопина Б.П. Никольский и А.А. Гринберг.

Первые порции плутония (в количестве 10^{12} атомов*) были получены в лаборатории № 2 Б.В. Курчатовым еще в 1945 г., т.е. до создания ядерного реактора. Для этого в течение 3 мес мишени из гидроксида урана облучали нейтронами из радий-бериллиевого источника. Практически тогда же в РИАНе были получены первые импульсные количества нептуния и плутония облучением мишеней в циклотроне. После пуска в 1945 г. более мощного циклотрона, а в конце 1946 г. реактора Ф-1, в лаборатории № 2 плутоний можно было получать в «весомых» количествах [11].

Как отмечает З.В. Ершова, «... научный отчет Радиевого института, известный всем радиохимикам как «синяя книга» (он имел синий переплет), изучался химиками, технологами, физиками, имеющими отношение к этому вопросу. На этом материале учились химики и технологи, которые ранее ничего не знали о радиохимии и даже

о радиоактивных элементах. Этот отчет долгое время был настольной книгой» [43, 50]. Именно эта работа, а также доклад В.Г. Хлопина 20 мая 1946 г. на НТС ПГУ дали возможность руководству атомного проекта уже летом 1947 г. развернуть строительство в Челябинске-40 радиохимического завода. После доклада В.Г. Хлопина НТС обязал всех руководителей — В.С. Емельянова, И.В. Курчатова, В.Б. Шевченко и др. — ускорить не только строительство и пуск реактора Ф-1, но и строительство при нем опытного радиохимического цеха. Это давало возможность проверить на урановых блоках, облученных в реакторе Ф-1, созданную РИАНом технологию выделения плутония. В цехе, который потом был назван установкой № 5 (в составе НИИ-9), с конца 1946 г. проводились экспериментальные работы для отработки технологии строящегося завода Б. На этом же НТС был заслушан главный проектант завода Я.И. Зильберман (ГСПИ-11). НТС установил И.В. Курчатову срок: к 1 марта 1947 г. урановые блоки, облученные в реакторе Ф-1, с накопленным в них плутонием поставить на опытную радиохимическую переработку. Ему же вместе с В.Г. Хлопиным, В.С. Емельяновым и В.Б. Шевченко поручалось в 10-дневный срок определить технические характеристики на урановые блоки, поступающие для радиохимической переработки. По предложению М.Г. Первухина, согласованному с В.Г. Хлопиным, НТС также рекомендовал из 4 схем радиохимической переработки урановых блоков принять для завода Б ацетатно-лантано-фторидную технологию.

В то время в РИАНе проводились интенсивные исследования химических свойств плутония на ничтожных количествах этого элемента, получаемых на циклотроне. Работой циклотрона руководил М.Г. Мещеряков*. Радиометрические исследования возглавлял один из авторов открытия в 1940 г. спонтанного деления урана К.А. Петржак, а также Б.С. Желепов и Г.Н. Горшков. Радиохимические методики разрабатывались под руководством Б.А. Никитина, И.Е. Старика, А.П. Ратнера и других ученых РИАНА.

Вскоре после издания в русском переводе книги Г.Д. Смита [36], была выпущена в двух томах книга «Научные и технические основы ядерной энергетики», в которой были отражены основные сложности решения атомной проблемы в США [52]. В разделе «Технология ядерного горючего» отмечалось, что при выделении ^{239}Pu удалять

* В 1993 г. им была опубликована работа о решающем вкладе В.Г. Хлопина в разработку программы получения делящихся материалов [51] и создании первого в Советском Союзе ускорителя заряженных частиц. Организатор проектирования и строительства в Дубне крупнейшего в мире синхрофазотрона. С 1947 по 1953 г. работал заместителем директора лаборатории № 2, а с 1953 по 1956 г. — директором Института ядерных проблем АН СССР.

алюминиевые оболочки с урановых блоков нужно не механически, а путем их химического растворения. При обращении с опасными продуктами деления рекомендовалось все технологические операции проводить на значительном расстоянии от густонаселенных районов и строить специальные, достаточно большие хранилища для радиоактивных отходов. Громадная интенсивность радиации от продуктов деления, сравнимая с радиоактивностью многих килограммов радия, требовала применения дистанционных методов во всех химических операциях. По-видимому, не без влияния этих публикаций В.Г. Хлопин рекомендовал на строящемся радиохимическом заводе предусмотреть следующую структуру и ориентировочные размеры отдельных цехов:

цех приготовления реагентов (12x40 м);
 цех с дистанционным управлением (40x65 м);
 цех для обслуживающего персонала (15x80 м);
 цех аффинажа плутония;
 хранилища сбросных радиоактивных растворов (15 тыс.м³/год)*;
 станция нейтрализации сбросных растворов;
 цех регенерации лантана;
 цех регенерации плавиковой кислоты;
 склады и вспомогательные цеха.

О расходе реагентов, объемах растворов и их химической и коррозионной агрессивности можно судить по данным переработки 1 т урановых блоков, т:

Азотная кислота (65%-я, техническая)	11,6
Ацетат натрия (58%-й)	11,0
Едкий натр (технический)	2,75
Плавиковая кислота (40%-я)	0,46
Вода технологическая (чистая)	56
Вода для охлаждения	2000
Пар	50

Предполагалось, что в 1 т урановых блоков содержится около 100 г плутония и 115 г радиоактивных продуктов деления урана.

В докладе В.Г. Хлопина назывались и другие реагенты с много меньшими нормами их использования.

В связи со сложностью радиохимической технологии и сверхнапряженными сроками строительства и ввода в эксплуатацию завода Б Ученый совет РИАНа рекомендовал руководству ПГУ привлечь к научным разработкам коллективы других институтов. Комиссия

* Позднее ИФХ рекомендовал концентрировать радиоактивность методом упаривания раствора для сокращения числа хранилищ [53]. Технология была не отработана и не могла быть реализована.



**БОРИС
АЛЕКСАНДРОВИЧ
НИКИТИН**
(1906–1952) —
научный руководитель
пуска радиохимического
завода, директор РИАНа
с 1950 по 1952 г.,
член-корреспондент
АН СССР с 1943 г.

№ 1, созданная при химико-металлургической секции НТС, в составе Б.А. Никитина, А.Н. Фрумкина, И.И. Черняева, И.В. Курчатова с участием А.А. Гринберга и С.З. Рогинского на заседании 1 ноября 1946 г. рассмотрела предложение РИАНа. Для улучшения координации работ и конкретизации ответственности коллективов институтов за создание технологии завода Б комиссия решила распределить ответственность руководителей за разработку технологии по стадиям:

Б.А. Никитин — определение выходов конечного продукта (оружейного плутония) по всему технологическому процессу (РИАН);

А.А. Гринберг — изучение окислительно-восстановительных процессов при отделении конечного продукта (РИАН);

С.З. Рогинский — действие радиоактивных излучений на операции технологического процесса выделения конечного продукта и поведение осколков — продуктов деления (ИФХ);

Б.В. Курчатов — изучение сорбции конечных продуктов и осколков деления в технологии получения конечного продукта: в осадках, при фильтрации в аппаратуре и т.д. (лаборатория № 2).

В условиях интенсивной ионизации изменяются многие обычные химические реакции:

- ускоряется коррозия конструкционных материалов и оборудования;
- образуются взрывоопасные перекиси в водных растворах;
- органические вещества разрушаются и полимеризуются;
- энергия излучения нагревает растворы и затрудняет контроль температуры при ведении технологического процесса.

Все это привело к большим трудностям при эксплуатации завода, которые проявились в первый же год (1949 г.) работы.

Для опробования отдельных процессов разработанной РИАНом технологии в Москве (рядом с реактором Ф-1) во вновь созданном НИИ-9 в 1946 г. была построена, а в 1947 г. введена в действие опытная установка № 5. Сочетание этой установки и опытного реактора лаборатории № 2 давало возможность на облученных в реакторе Ф-1 урановых блоках не только опробовать технологию, но и испытать конструкцию оборудования и систем контроля будущего радиохимического завода. В связи с тем что содержание плутония в уране было незначительным, установка не имела биологической защиты. Для работы на установке из РИАНа была направлена группа научных сотрудников, которые вместе с работниками НИИ-9 и специалистами других институтов проверяли одобренную НТС технологическую схему. Общее научное руководство работами осуществлял заместитель директора РИАНа Б.А. Никитин с участием А.П. Виноградова, Б.П. Никольского, А.П. Ратнера, И.Е. Старика, З.В. Ершовой и В.Д. Никольского. На установке, проработавшей 1,5 года, были проведены десятки операций, начиная с загрузки облученных в реакторе Ф-1 урановых блоков и кончая получением готового концентрата плутония.

План научно-исследовательских работ всех институтов-соисполнителей по проверке технологии РИАНа в НИИ-9 на установке № 5 был доложен начальником лаборатории НИИ-9 З.В. Ершовой 12 июля 1947 г. на секции № 4 НТС и в целом одобрен.

Во второй половине 1947 г. на установке проверяли ацетатно-фторидную схему извлечения плутония. Определяли выход плутония на отдельных операциях, полноту удаления осколков — продуктов деления, степень возможной очистки от радиоактивного йода и ксенона, обезвреживание сбросных растворов. Проводили исследования коррозии оборудования, надежности измерительной аппаратуры. Проверяли эффективность методов защиты обслуживающего персонала. Для этого необходимо было исследовать материал с максимальной радиоактивностью до 10 Ки.

Особенно важной проблемой для завода Б была организация достаточной производственной вентиляции. Необходимо было определить, можно ли сбрасывать в атмосферу безопасно для окружающей среды и населения газообразные продукты деления, такие, как йод, ксенон и др., образующиеся при растворении урановых блоков. Было известно, что особо опасный ^{131}I имеет период полураспада примерно 8 сут, и предварительная выдержка облученных блоков в бассейнах промышленного реактора, хотя и уменьшала его содержание в 15–30 раз, была недостаточной для полного распада этого радионуклида. В конце 1946 г. секция № 4 НТС с участием Е.П. Славского

(ПГУ), В.Г. Хлопина и Б.А. Никитина (РИАН), И.В. Курчатова, В.И. Меркина (лаборатория № 2), С.З. Рогинского, В.И. Спицына, О.М. Тодеса (ИФХ), А.З. Ротшильда (ГСПИ-11), З.В. Ершовой (НИИ-9) и ведущих специалистов НИИ-26 (Минхимпром) рассмотрела сообщения ГСПИ-11 и ИФХ по проекту вентиляции завода Б и решила принять его за основу. Предусматривалось газы, образующиеся при растворении урановых блоков, сбрасывать в атмосферу через трубу высотой 130 м с предварительным разбавлением их в трубе воздухом. Для отделения радиоактивного йода от других газообразных продуктов деления по предложению С.З. Рогинского (ИФХ) и Б.А. Васьковского (НИИ-26) был одобрен сорбционный метод. В качестве сорбента был применен силикагель, пропитанный азотнокислым серебром. Институтам были даны поручения разработать предложения по удержанию тех радионуклидов, которые не задерживаются предлагаемым сорбентом. Эти и многие другие проблемы решались в 1947 г.— начале 1948 г.

Практически неразрешимой в то время оказалась проблема полного обезвреживания огромного количества радиоактивных растворов, образующихся после выделения плутония. В течение двух дней (25–26 июля 1947 г.) на секции № 4 НТС были заслушаны и обсуждены доклады головных институтов (от ИФХ — С.З. Рогинский, от РИАНа — И.Е. Старик) по проблеме жидких радиоактивных отходов. Проанализировав состояние разработок, секция пришла к выводу, что снизить концентрацию радионуклидов в сбросных растворах $<10^{-7}$ Ки/см³ не представляется возможным и сброс их в открытую гидросеть неизбежен. В обращении секции в Минздрав страны предлагалось сообщить главному проектировщику завода Б (ГСПИ-11) допустимые (толерантные) дозы в связи со сбросом частично радиоактивных растворов в водоемы в районе строительства комбината.

После проведения опытных работ на установке № 5 и дополнительных исследований в институтах к лету 1948 г. усилиями сотрудников РИАНа, НИИ-9, ИФХ, ГЕОХИ, ИОНХ была выдана модифицированная технология радиохимического завода. В уточнении технологического процесса принимали участие ведущие ученые: А.Н. Фрумкин, П.А. Ребиндер, В.И. Спицын, С.З. Рогинский (ИФХ), В.Б. Шевченко, З.В. Ершова, В.Д. Никольский (НИИ-9), Б.Н. Ласкорин, Я.И. Коган (НИИ-26) и др.

Как отмечает М.В. Гладышев [43], к тому времени еще не была выработана культура работы на радиохимическом производстве. Отсутствовал должный контроль за радиационным загрязнением, работали без спецдежды, без защитных респираторов. В соответствии с обращением главного инженера комбината Е.П. Славского при РИАНе организуются курсы подготовки кадров для завода Б. Б.А. Никитин и А.П. Ратнером была разработана программа обучения на 70 ч для инженеров и на

59 ч для техников-химиков. Занятия проводились в РИАНе, на химическом факультете Ленинградского государственного университета и в московском НИИ-9. Под руководством начальника лаборатории З.В. Ершовой и доктора химических наук В.Д. Никольского, переведенных в начале 1945 г. из Гиредмета, на установке № 5 в НИИ-9 прошли стажировку многие работники комбината, возглавившие затем цеха и службы радиохимического завода. Работники комбината проходили стажировку и в РИАНе.

14 июля 1948 г. НТС РИАНа под руководством В.Г. Хлопина заслушал полный отчет Б.А. Никитина о работах на установке № 5 и принял решение просить руководство ПГУ утвердить проект завода Б. К этому времени основные инженерно-технические работники получили соответствующую подготовку, а строительство завода Б и монтаж оборудования находились на завершающей стадии. Среди будущих руководителей радиохимического завода на установке № 5 работали Б.В. Громов — первый главный инженер радиохимического завода, М.В. Гладышев и А.И. Пасевский — заместители главного инженера, Н.С. Чугреев — начальник отделения конечной стадии извлечения концентрата плутония фторидным методом, Н.Г. Чемарин — начальник технологической лаборатории, Я.П. Докучаев — начальник группы радиометрических методов контроля технологического процесса завода Б. Работа на установке № 5 велась под контролем руководителей НИИ-9 и с участием лаборатории № 2. Ее сотрудники (М.И. Певзнер, Б.В. Курчатова и др.) работали в тесном контакте с НИИ-9 и другими институтами.

Испытания на установке в НИИ-9 подтвердили эффективность технологии РИАНа для выделения плутония. На основании полученных данных ГСПИ-11 проектировал радиохимический плутониевый завод. Проведение испытаний осложнялось тем, что в распоряжении экспериментаторов были только мизерные количества плутония. Мешала сорбция плутония на стенках аппаратуры и в осадках, а так как весовые концентрации плутония и продуктов были очень малы, иногда плутоний в конечных продуктах на установке не обнаруживали. Сочетание осадительных и экстракционных процессов позволило получить первые концентраты плутония в конце 1947 г. в микрограммовых и в 1948 г. — в миллиграммовых количествах. С установки до конца первого полугодия 1948 г. в группу В.Д. Никольского (лаборатория З.В. Ершовой) поступило 3,6 мг плутония [38].

Проектирование и строительство

Ленинградский ГСПИ-11 приступил к разработке проекта завода в 1946 г. на основании исходных данных РИАНа, которые уточнялись до середины 1948 г.* Первое проектное задание на строительство

* Строительство завода Б началось в декабре 1946 г.



**ЗИНАИДА
ВАСИЛЬЕВНА
ЕРШОВА
(1904—1995) —**

**начальник
лаборатории
НИИ-9.**

**В 1937 г. работала
в Париже
в лаборатории
Мари
Склодовской-Кюри**

было представлено РИАНом (В.Г. Хлопин, Б.А. Никитин, А.П. Ратнер) совместно с ГСПИ-11 (Я.И. Зильберман, Н.К. Хоманский) еще в первом квартале 1946 г.

Руководством ГСПИ-11 (А.И. Гутов, В.В. Смирнов) было создано специальное бюро комплексного проектирования № 2 (начальник Л.А. Сытин, главный инженер А.А. Хоникевич). Проектные работы выполняли А.З. Ротшильд, Я.И. Зильберман, М.А. Ходос, А.Н. Кондратьев, В.А. Хохлов, М.В. Иолко, Э.В. Старобин, Л.Н. Жукова и др. Проектами различных отделений завода руководили В.В. Смирнов, А.А. Черняков, А.З. Ротшильд, А.В. Гололобов, В.А. Курносов и др. По мере отработки технологии технические задания корректировались РИАНом и руководством комбината. На первом этапе проектирования РИАН участвовал во всех разделах проекта, включая технологический процесс, контрольно-измерительную аппаратуру, выбор конструкционных материалов, проблемы регенерации и чистоты реагентов, очистку сбросных растворов от радиоактивных продуктов, мероприятия по защите персонала.

Одновременно решались проблемы улавливания радиоактивных аэрозолей, радиоактивных газов и летучих радиоизотопов, намечались пути обезвреживания радиоактивных отходов, а также выделения ценных радионуклидов из продуктов деления. Урановые блоки после облучения в реакторе были высокоактивны. Активность 1 т облученных блоков была эквивалентна сотням тысяч грамм-эквивалентов радия. Большую часть активности давали короткоживущие радионуклиды. Кроме того, в извлеченном из реактора уране содержался ²³⁹Np, который распадается и превращается

в ^{239}Pu (основной компонент оружейного плутония) с периодом полураспада примерно 2,3 сут. Поэтому извлеченный из реактора облученный уран должен быть выдержан для увеличения содержания в нем плутония и снижения радиоактивности. Наиболее опасный, трудноуловимый радионуклид — ^{131}I (период полураспада 8 сут). Время выдержки облученного урана должно быть ≥ 120 –140 сут, чтобы концентрация ^{131}I уменьшилась в тысячу раз*. При этом общая активность облученного урана уменьшается в сотни раз.

Для снижения уровня загрязнения прилегающей к комбинату территории в проекте было предусмотрено строительство самой высокой на Урале вытяжной трубы (высота 151 м², диаметр у основания 11 м, наверху 6 м). Сложности строительства и монтажа оборудования завода изложены в работах [43, 54].

Строительство завода и монтаж оборудования выполнялись под руководством главного инженера стройки В.А. Сапрыкина. Общее руководство монтажными работами осуществлял заместитель министра специальных монтажных работ И.А. Ануфриев³. Строительные и монтажные работы выполняли коллективы строительно-монтажных управлений (СМУ), многие из которых работали до этого на объекте А. Десятки заводов и институтов страны изготовляли оборудование, многочисленные приборы и системы дистанционного контроля, различные коррозионностойкие материалы. Завод Б, как и в целом комбинат и город Челябинск-40, строили гражданские и военные строители, а также большое число заключенных. Всего на строительстве комбината в 1947–1948 гг. работали около 45 тыс. чел. Руководители строительных и монтажных работ, как правило, были вольнонаемными инженерами и офицерами войск МВД. Большинство рабочих строителей — это десятки тысяч заключенных, привезенных из различных лагерей ГУЛАГа. Было много и вольнонаемных рабочих, которые привлекались с разных предприятий страны, затем становились постоянными работниками стройки, а некоторые переходили работать в коллективы эксплуатационников. Для монтажа оборудования привлекались специалисты различных заводов и выпускники учебных заведений [33, 35]. Особо запомнились работникам завода Б следующие специалисты-руководители: проектировщики Я.И. Зильберман, Г.Н. Локтев, А.З. Ротшильд; строители А.К. Грешнов, А.В. Пичугин; монтажники Н.К. Смазнов, Е.С. Ключин, Е.Я. Николаевский, А.А. Дершин, Г.М. Кауфман. В монтаже

* В первый год работы завода Б выдержка облученного урана не превышала 45 дней.

² В конце 1946 г. высота трубы намечалась 130 м (решение секции № 4 НТС).

³ В начальный период все строители и монтажники были в составе Главпромстрой НКВД СССР.

оборудования, приборов и всех систем функционирования завода участвовали практически все организации, проводившие монтаж реактора А [33, 43].

Следует подчеркнуть, что завод находился под непрерывным контролем Специального комитета, научного руководителя проблемы, руководства ПГУ, дирекции комбината, руководителей пусковой бригады Б.А. Никитина, А.П. Ратнера (РИАН), А.П. Виноградова (ГЕОХИ), а также главных инженеров комбината Е.П. Славского и завода Б.Б.В. Громова. Некоторые ветераны отрасли (например, Ю.Б. Харитон и Ю.Н. Смирнов) склоняются к мысли, что только с переходом проблемы лично в руки Л.П. Берии кардинально изменились темпы работы над Урановым проектом. Если бы проект оставался под руководством В.М. Молотова (и М.Г. Первухина), трудно было бы рассчитывать на быстрый успех в проведении столь грандиозных по масштабу работ [44]. Не следует забывать, что В.М. Молотов и М.Г. Первухин руководили Урановым проектом во время войны (1943–1945 гг.), когда все ресурсы страны были направлены для фронта. Во второй же половине 1945 г., когда над Хиросимой и Нагасаки американцы взорвали атомные бомбы и продемонстрировали готовность диктовать миру свои требования, отношение к Урановому проекту у нас в стране стало совершенно другим. Важнейшая роль в решении атомной проблемы в послевоенный период, несомненно, принадлежала Специальному комитету, в котором работал и М.Г.Первухин. Здесь уместно привести высказывание И.В. Курчатова, сделанное им еще в 1958 г. [55]: «В конце войны, когда Германия капитулировала, а военная мощь Японии рухнула, американские самолеты сбросили две атомные бомбы на японские города Хиросиму и Нагасаки. Погибло от взрыва и пожаров более 300 тыс. чел., а 200–250 тыс. мирных жителей было ранено и поражено радиацией. Эти жертвы побуждали американским военным политикам для того, чтобы положить начало беспримерному атомному шантажу и холодной войне против СССР».

Специальный комитет подчинил в послевоенный период основные ресурсы страны решению проблемы создания ядерного оружия. Как писал Ю.Б. Харитон, «нам давали всех и все». Во время войны это было невозможно, даже если бы эту проблему возглавлял лично И.В. Сталин. Примерно за 2,5 года были построены и введены в эксплуатацию на Плутониевом комбинате два крупнейших, уникальных производства (первый промышленный реактор и первый радиохимический завод), а также подготовлен к пуску завод В для получения конечного продукта комбината. К середине 1948 г. были построены и сданы в эксплуатацию все дополнительные объекты (ТЭЦ, заводы водоподготовки, железнодорожный цех и паровозное депо, ЦЗЛ, ремонтно-механические цеха и т.д.), обеспечившие рабо-

ту трех указанных заводов. С 1946 г. было открыто движение поездов от станции Кыштым. В музее ПО «Маяк» приведено содержание акта приемки в эксплуатацию завода Б. В нем указаны основные создатели завода: РИАН — начальная стадия проекта, научный руководитель академик В.Г. Хлопин; ГСПИ-11 — генеральный проектировщик, главный инженер проекта А.З. Ротшильд, главный технолог Я.И. Зильберман; НИИхиммаш — изготовитель рабочих чертежей основного оборудования, директор Н.А. Доллежал; ИФХ — выбор материалов для оборудования, академики А.Н. Фрумкин и П.А. Ребиндер. Строительные работы выполняло управление № 859 МВД СССР под руководством Д.С. Захарова. СМУ-71 «Уралэлектромонтаж» под руководством Б.В. Бакина и А.М. Гнесина осуществляло весь электромонтаж. Общее руководство монтажными работами возглавлял заместитель министра Минтяжстроя СССР И.А. Ануфриев. Контроль над производством работ осуществляли Монтажное управление строительства (Г.М. Кауфман) и организация из МПС СССР под руководством Ю.А. Найдича. К этому времени от станции Кыштым были построены все подъездные железнодорожные пути, в том числе для транспортирования в специальных вагонах-контейнерах облученных урановых блоков на завод Б.

Начальный период работы

Пуск завода осуществлен в конце 1948 г. Среди руководителей подразделений завода следует назвать М.И. Ермолаева (начальник аналитической лаборатории), Е.С. Костарева (начальник отделения № 3), Н.С. Чугреева (начальник отделения № 8), Ю.Н. Лаврентьева (начальник экстракционного отделения № 12 в здании 102), Б.Н. Броховича (главный энергетик, будущий директор комбината), С.Б. Цфасмана (главный приборист), Ю.С. Фролова (начальник дозиметрической службы), М.Е. Сопельняка (главный механик), И.А. Терновского (будущий начальник ЦЗЛ), Н.Г. Чемарина (начальник технологической лаборатории), А.Ф. Пашенко (начальник отделения № 7, будущий главный инженер завода Б, а затем комбината). Главными дежурными технологами завода были А.А. Каратыгин, А.В. Кузмичева, Г.Ф. Черевань, Е.Д. Вандышева, Н.А. Соколов, Н.Г. Чемарин.

В музее ПО «Маяк» собраны имена многих руководителей, а также механиков и энергетиков, которым пришлось обеспечивать работу оборудования в высоких полях радиации. Среди работников отделений можно назвать И.Д. Горбатьюка, А.Г. Ведюшкина, И.И. Балякина, Я.Т. Саморядова, А.И. Николаева, В.И. Беляева, И.Н. Гордина, В.А. Попова. Руководителями отделений работали А.М. Зубаев, В.И. Титов, И.А. Барков, В.К. Астрахов, А.А. Волкова. Численность эксплуатационного персонала завода Б в несколько раз превышала таковую промышленного реактора.



**БОРИС
ВЕНИАМИНОВИЧ
ГРОМОВ
(1909–1984) —
первый
главный инженер
завода Б**

Заместитель директора РИАН член-корреспондент АН СССР Б.А. Никитин руководил пусковой бригадой исследователей всех институтов, участвующих в работах по радиохимическому заводу. Директор ГЕОХИ член-корреспондент АН СССР А.П. Виноградов был заместителем руководителя пусковой бригады и одновременно помощником И.В. Курчатова по аналитической химии [54]. Другим ближайшим помощником руководителя пусковой бригады был доктор химических наук профессор А.П. Ратнер — один из создателей «синей книги», описывающей технологию завода Б.

Завод был построен с использованием ацетатно-фторидного процесса. Параллельно для проверки более прогрессивного экстракционного процесса в здании 102 создавалась специальная установка. С первых же месяцев работы возникли проблемы коррозионной стойкости оборудования. Директором ИФХ членом-корреспондентом АН СССР Г.В. Акимовым* был предложен никром в качестве материала технологических аппаратов. Однако никром сильно корродировал. Поэтому в дальнейшем некоторые емкости, в том числе и химические реакторы, стали покрывать серебром и золотом [43].

Первая загрузка облученных блоков в аппарат-растворитель А-201 завода Б была сделана 22 декабря 1948 г. Однако первая готовая продукция на конечном переделе завода была выпущена только в феврале 1949 г. Ответственным за технологический процесс растворения урановых блоков был профессор Б.П. Никольский^{†2},

* С 1947 г. Г.В. Акимов был руководителем Комиссии по борьбе с коррозией АН СССР.

^{†2} Б.П. Никольский — физикохимик, радиохимик, работал в Ленинградском государственном университете и РИАНе. Академик с 1968 г.

который впоследствии, после отъезда А.П. Ратнера в РИАН, оставался научным руководителем радиохимического завода.

Выделенный плутоний нужно было очистить от продуктов деления, чтобы их содержание при этом уменьшилось в миллионы раз. Для этого урановый раствор подвергали ацетатным переосаждениям, отделяли плутоний от урана и осколков. Полученный концентрат плутония подвергали дополнительной очистке от тех же примесей, но уже осаждением из фторидных растворов. При этом использовалась разная способность плутония и урана к восстановлению. Вначале уран и плутоний окисляли бихроматом калия в азотнокислой среде шестивалентного состояния и осаждали в виде солей, в растворе при этом оставались макропримеси и продукты деления. Раствор сбрасывался, а осадок растворялся, восстанавливался бисульфитом и вновь осаждался ацетатом. При этом уран сохранял шестивалентную форму, а плутоний переходил в четырехвалентную и уже оставался в растворе. После фильтрования соли урана оставались на фильтре, а плутоний — в растворе. Эта технология была заложена в самом первом варианте промышленной радиохимии [43, 49]. Этот же принцип отделения урана от плутония применялся при повторной очистке, т.е. аффинаже, но осаждение велось не в ацетатной, а в азотнокислой среде в присутствии фтора. Затем раствор окисляли бихроматом и добавляли плавиковую кислоту. Образовывался осадок фторидов редких металлов вместе с лантаном, который добавляли в раствор перед осаждением. В окисленной среде плутоний оставался в растворе, а с осадком выводились продукты деления и лантан. Затем раствор восстанавливали бисульфатом и после добавления лантана осаждали плутоний.



**АЛЕКСАНДР
ПАВЛОВИЧ
ВИНОГРАДОВ**
(1895—1975) —

помощник
И.В. Курчатова
по аналитическому
контролю,
директор ГЕОХИ,
академик с 1953 г.

Сложность ведения технологического процесса можно представить, если учесть, что емкость аппаратов измерялась сотнями и даже тысячами литров, а число трубопроводов, запорной арматуры, всякого рода приборов и уровнемеров исчислялось сотнями. Объемы используемых кислот и других реагентов во много раз превышали количество загружаемого в оборудование урана. Неспециалисту трудно представить все трудности проведения химических процессов, когда содержание продукта (плутония) в уране составляло всего около 0,01%, или десятки граммов, на 1 т урана.

Начальный период работы обнажил все трудности ведения процесса и показал многие недостатки проекта, которые устраняли по ходу освоения технологии. Растворы попадали в вытяжную вентиляцию, плутония часто не оказывалось ни в растворах, ни в осадках. Большая площадь поверхности технологических аппаратов, трубопроводов и другой арматуры была причиной того, что из-за сорбции плутония на стенках емкостей он «пропадал». Создавались непредвиденные трудности в его обнаружении и в целом в ведении технологических процессов. Агрессивность сред вызывала коррозию оборудования и арматуры, нарушалась герметичность оборудования и усложнялись условия работы эксплуатационного персонала. Ремонтные службы предприятия, в первую очередь инженеры-механики, прибористы, коррозионисты*, все без исключения сотрудники аналитической лаборатории работали в «аварийном» режиме, получая недопустимо большие дозы облучения. Достаточно сказать, что дозы облучения в среднем на одного работника завода Б в 1949 г. составили 48 бэр/год. В 1950 и 1951 гг. технология отлаживалась, «грязное», частично разрушенное оборудование заменялось на более совершенное, улучшались методы контроля, заменялись приборы и датчики. Из-за коррозии заменялись материалы в арматуре и аппаратах. Все это приводило к тому, что дозы облучения возрастали и в 1950–1951 гг. в среднем достигали приблизительно 100 бэр/чел.-год [46, 47].

В табл. 9 приведены дозы облучения персонала на заводе Б в период с 1949 по 1962 г. Только к 1962 г. средняя годовая доза облучения персонала завода Б снизилась до значения <10 бэр. В 1962 г. примерно у 50% работников завода годовая доза облучения не превышала 5 бэр, лишь у отдельных сотрудников она составляла 25 бэр/год.

В тяжелейших условиях коллектив завода Б, руководство комбината и ПГУ вместе с научными руководителями атомной проблемы и радиохимической технологии обязаны были уже в начале 1949 г. выдать на следующий технологический цикл (завод В) плутоний в количестве, достаточном для изготовления атомной бомбы (взорва-

* В группе коррозии работали В.И. Балашов, позднее Р.Д. Анашкин, Е.Н. Миролюбов, М.Д. Мещеряков.

Таблица 9

**Дозы облучения персонала первого радиохимического завода
при выделении плутония из облученных в реакторе А урановых блоков,
% общего числа работающих на заводе Б [47]**

Год	Доза облучения, бэр				Средняя доза облучения, бэр/год
	25	25—100	100—400	400	
1949	26,9	66,2	6,9	—	48,0
1950	21,5	42,0	36,0	0,5	94,0
1951	13,8	41,6	42,8	1,8	113,3
1952	21,8	57,0	21,2	—	66,0
1953	50,7	47,3	2,0	—	30,7
1954	70,8	29,1	0,1	—	20,0
1955	66,5	33,2	0,3	—	21,3
1956	76,9	23,1	—	—	16,2
1957	74,4	25,5	0,1	—	17,5
1958	90,9	9,1	—	—	10,8
1959	96,8	3,2	—	—	14,7
1960	100*	—	—	—	15,2
1961	100*	—	—	—	11,0
1962	100*	—	—	—	7,6

* Доза >5 бэр/год (в настоящее время предельно допустимая доза для работающих в отрасли) в 1960–1962 гг. была соответственно у 60; 37 и 50,9% работающих.

ли на полигоне в конце августа 1949 г.). А об этом количестве в то время не положено было знать не только работникам комбината, но и руководителям институтов. Уместно привести воспоминание участника получения первой порции готовой продукции, полученной на заводе Б: «Первую порцию готовой продукции в виде пасты мы соскабливали ложкой с нутч-фильтра в специальном каньоне вдвоем с Чугреевым еще в феврале 1949 г. Как ни трудно было извлечь плутоний из обилия примесей, но удалось это сделать неоднократной щелочной разваркой, растворением, промывкой. Выдача первой порции проводилась из «подвального» помещения, которое мы почему-то называли каньоном, в присутствии представителей науки и администрации. Заложили «пасту» в эбонитовую коробку и передали ее заводу-потребителю. Сколько плутония там было, мы не знали, да и знать нам не рекомендовалось. Даже потом, когда я был уже главным инженером, количество плутония, заложенное в плане, было известно только начальнику объекта, а вся документация готовилась только в одном экземпляре» [43]. Далее М.В. Гладышев описывает, как в экстракционном отделении (здание 102) проводилась выдача про-

дукции. Эта ответственная операция осуществлялась начальником отделения, сначала Ю.Н. Лаврентьевым, а затем сменившей его Г.Н. Заряновой. Она сама занималась подготовкой товара на выдачу и бывали случаи, когда за день работы Галина Николаевна принимала облучение до 25 бэр. Вскоре ее вывели в «чистые» условия, и новый начальник отделения Н.П. Вакуленко занимался тем же. Для обеспечения безостановочной работы персонал часто подвергался переоблучению и в других отделениях зданий 101 и 102*.

Совершенствование технологии и ее приборного контроля позволило уже через несколько лет снизить дозовые нагрузки на персонал. Эти работы проводились под руководством Е.П. Славского, а затем — Г.В. Мишенкова техническим персоналом завода Б, а также сотрудниками РИАНа, НИИ-9, ИФХ и других институтов. Значительный вклад в отработку технологии завода Б внесли работники ЦЗЛ (Н.Г. Чемарин, В.И. Землянухин, В.М. Тараканов, И.А. Терновский, Л.П. Сохина, Я.П. Докучаев и др.) и прибористы специального конструкторского бюро, созданного на комбинате во главе с Ю.Н. Геруляйтисом, Г.Г. Поповым и С.Н. Работновым. Впоследствии технологическая схема завода претерпела серьезные изменения. На месте наиболее сложного отделения № 8 было смонтировано новое оборудование отделения № 26, в котором конечной готовой продукцией был азотнокислый раствор нитрата плутония с допустимым содержанием примесей. На заводе были организованы регенерация и очистка от радионуклидов ряда химических реагентов для их повторного использования, а также проведены работы по сокращению сброса радионуклидов за пределы завода.

Опубликованные материалы о передаче нашей стране секретов создания ядерного оружия в США [44] подтверждают, что, действительно, данные США облегчили нам разработку схемы атомной бомбы. Но эти «секреты» не могли помочь при получении ядерной взрывчатки — плутония. В стране были созданы все технологические процессы, материалы и оборудование радиохимического производства.

Изменение уровней облучения эксплуатационного персонала

Уже после пуска реактора Ф-1, установки № 5, а затем первого промышленного реактора стала очевидной необходимость регламентирования работы персонала в условиях искусственно получаемой радиоактивности. Перед пуском завода Б в августе 1948 г. Минздравом СССР и соответствующими подразделениями ПГУ были подготовлены Общие санитарные нормы и правила по охране здоровья работающих на объектах А и Б. Промышленностью еще до ввода реактора А и радиохимического завода был освоен выпуск дозимет-

* В дальнейшем здание 102 было закрыто, а на заводе Б была использована цельноаэстатная схема аффинажа плутония.

рической аппаратуры для контроля мощности экспозиционной дозы γ -излучения. Для оперативного измерения суточных доз облучения персонала на заводе Б была создана специальная лаборатория, которая могла обрабатывать 2500 индивидуальных кассет-дозиметров за сутки [47]. Для измерения доз применялась немецкая рентгеновская пленка с достаточной чувствительностью. Индивидуальный контроль внешнего γ -облучения персонала осуществлялся с помощью фотопленочных дозиметров, которые могли регистрировать дозу от 0,05 до 3 сЗв^{*} в энергетическом диапазоне 0,4–3 МэВ с точностью 30%. На основании господствующей в те годы концепции толерантной (допустимой) дозы устанавливалась дневная зона – 0,1 сЗв за 6 рабочих часов (или примерно 30 сЗв за год). В случае аварии допускалось однократное облучение в зоне ≤ 25 сЗв за время ≥ 15 мин, после чего требовалось проводить медицинское обследование работника и обязательно предоставлять ему отпуск или работу, исключающую контакт с радиацией [47]. Однако в первые месяцы работы объекта, как вспоминает М.В. Гладышев, дозиметрический контроль практически отсутствовал и никто не знал, какое облучение получали рабочие и инженеры завода [43].

На заводе Б схема размещения технологического оборудования была такой, что радиоактивному загрязнению подвергались практически все помещения. Из-за коррозии, нарушения герметичности оборудования и по другим причинам продукты, попавшие в обслуживаемые помещения, содержали кроме γ -активных продуктов деления значительные количества α -активных продуктов, в том числе изотопов плутония. Все это загрязняло воздух помещений и попадало в организм человека, увеличивая не учитываемую тогда эквивалентную дозу облучения. После активных поисков были найдены пути защиты органов дыхания от радиоактивных аэрозолей. Под руководством И.В. Петрянова² были созданы из ткани, названной его именем, индивидуальные средства защиты, так называемые «лепестки», обязательно применяемые на производствах и в учреждениях, где ведется работа с «пылящими» радиоактивными веществами.

Опасность работы в условиях повышенного радиационного воздействия понимали и работники Плутониевого комбината – от директора до рядовых сотрудников объектов А, Б и В. Однако люди сознавали, что без их самоотверженного труда страна не сможет создать ядерное оружие. Это понимание и заставляло их рисковать своей безопасностью. Иногда риск был связан и с исправлением персоналом собственных ошибок и нарушений технологической дисциплины, а за

* 1 сЗв=1 бэр.

² И.В. Петрянов-Соколов – физикохимик, разработал методы исследования аэрозолей, академик с 1966 г. С 1929 г. работает в Научно-исследовательском физико-химическом институте им. Л.Я. Карпова.

нарушения и ошибки тогда строго спрашивали. За некоторые нарушения снимали с работы и отдавали под суд.

Несмотря на введение в 1949 г. Положения о контроле за состоянием здоровья работающих, запрещении проведения радиационно опасных работ без письменного разрешения руководства, проведении наиболее опасных работ в присутствии дозиметриста, дозы облучения персонала завода Б возрастали в течение 1950 г., а в 1951 г. достигли максимума — 113,3 бэр/год в среднем на одного работающего, а у некоторой части работников — существенно выше (см. табл. 9). Особо большие дозы облучения в первые годы на заводе Б получал основной персонал технологических цехов и работники лаборатории. Средние суммарные дозы внешнего γ -облучения за период 1948—1958 гг. составляли [45], бэр:

Работники службы дозиметрии:	147,6
КИПиА	185,1
энергетика	127,8
механика	163,9
Проботборщики радиохимической лаборатории	144,3
Основной персонал технологических цехов	170,8—267,7
Работники хозяйственных служб, включая десорбщиков производственных помещений	69,7

Еще в 1949 г. на комбинате были зарегистрированы первые случаи лучевых заболеваний. В марте 1950 г. Коллегия ПГУ постановила:

- еженедельно анализировать данные об индивидуальном облучении работающих, немедленно принимать меры по снижению радиоактивного загрязнения рабочих мест;
- пересмотреть штаты и структуры дозиметрических служб объектов А* и Б;
- наказывать за нарушения норм, не связанные с чрезвычайными обстоятельствами

Наказывали тогда и за срыв наработки плутония на объекте А, и за срыв плана по выделению плутония из облученных урановых блоков на заводе Б, и за несвоевременную поставку его на следующий завод — объект В.

В значительной мере у части сотрудиников получение больших доз радиации было связано с действующим на комбинате жестким режи-

* В 1949 г. средняя доза облучения персонала на промышленном реакторе была примерно в 2 раза выше, чем на заводе Б, и составляла 93,6 бэр/чел.-год.

мом секретности. Так, отсутствие информации о количестве плутония, находящегося в оборудовании, ограничение круга лиц, знающих о его наличии на объекте, отсутствие достоверных данных о безопасных нормах загрузки в оборудование и транспортировке растворов с плутонием иногда приводили к трагическим последствиям.

В обзоре [43] приводятся примеры трагического переоблучения не только рядовых и руководящих работников завода Б, но и крупнейших ученых, в первую очередь из РИАНа, обеспечивших в начальный период работу предприятия. Среди них — техник-механик А. Кузьмин, инженер-механик А.Г. Ведюшкин. Отдельные сотрудники завода, а таких в 1950—1951 гг. было 36—43%, получили по 100—400 бэр, и это несмотря на действовавшие в 1948—1952 гг. нормы, допускающие годовое облучение до 30 бэр [46, 47]. Научный руководитель пуска завода Б.А. Никитин, ставший в 1950 г. директором РИАНа, умер через 2 года от лучевой болезни. Прожил только 50 лет и профессор А.П. Ратнер.

За период становления производства плутония на комбинате профессиональное лучевое заболевание было диагностировано у 2089 работников, 6 тыс. чел. получили суммарную дозовую нагрузку >100 бэр, в том числе ≥ 25 бэр в течение года. Свыше 2000 чел. имели в организме превышение допустимого содержания плутония (40 нКи). По опубликованным данным, у 17245 чел. был превышен допустимый годовой уровень облучения в 25 бэр [46, 56]. С 1948 по 1958 г. сотрудники первых заводов Плутониевого комбината работали в самых неблагоприятных условиях. Прошедшие годы позволяют радиобиологам-медикам относительно надежно судить о возникновении злокачественных новообразований у обслуживающего персонала в первые годы работы радиохимического производства. По архивным данным местных отделений 3 ГУ Минздрава установлена частота заболеваний хронической лучевой болезнью для групп работников завода Б в 1948—1958 гг. в зависимости от доз облучения:

Средняя (суммарная) доза γ -облучения за весь период работы	340 $\pm$ 5 бэр
Максимальная доза за год	150 $\pm$ 4 «
Частота случаев от общего числа лиц в группе	22,5 $\pm$ 0,6%

Частота заболеваний лиц, получивших меньшие дозы, существенно ниже. Однако среди тех, кто не болел хронической лучевой болезнью, было много лиц, получивших существенно большие дозы радиации, превышающие не только ныне действующие (5 бэр/год), но и принятые в те годы (30 бэр/год). Все это требует дополнительного анализа [48].

Из табл. 10 видно, что большие дозы облучения увеличивают онкологическую смертность. Учитывая, что в стране в целом смертность взрослого населения от онкологических заболеваний составляет 200 случаев на 100 тыс. человек в год, т.е. за 30 лет 6%, можно сделать вывод, что при малых дозах (≤ 100 бэр за годы наблюдений и 25 бэр/год) онкологическая смертность не отличается от общей смертности взрослого населения страны [46]. Однако успокаивающие выводы, сделанные авторами работ [46–48] через 30 с лишним лет после пуска завода, в первые годы работы Плутониевого комбината были неизвестны.

Таблица 10

**Уровень онкологической смертности персонала завода Б,
% общего числа начавших работу до 1958 г. [46]**

Доза облучения	По заводу Б	В целом по заводам А и Б
Суммарная доза γ -облучения < 100 бэр	$4,3 \pm 0,4$	$4,8 \pm 0,4$
Суммарная доза γ -облучения > 100 бэр	$8,1 \pm 0,6$	$8,4 \pm 0,5$
Максимальная годовая доза < 25 бэр	$4,2 \pm 0,5$	$4,0 \pm 0,4$
Максимальная годовая доза > 25 бэр	$7,7 \pm 0,05$	$7,9 \pm 0,5$

На комбинате как по собственной инициативе, так и по указаниям ПГУ и Минздрава СССР проводилась реализация мероприятий по снижению общей облучаемости персонала. В 1949–1951 гг. не только оценивались причины переоблучения персонала при введении технологических процессов на радиохимическом заводе, но и выяснялись причины образования не предусмотренных проектом жидких радиоактивных отходов, сбрасываемых в открытую гидросеть.

Кроме производственного персонала от радиации тогда пострадало и население, проживавшее в прилегающих к комбинату районах.

Сбросы радиоактивности в естественные водоемы и их последствия

Хотя прошло 45 лет со времени пуска комбината, все еще задаются вопросы о причинах сбросов радиоактивности в реку Теча, приток реки Исеть, впадающей в реку Тобол. Кто принимал эти решения?

Промышленный реактор, радиохимический завод и другие предприятия комбината № 817 находились в междуречье Теча–Мишеляк. Слаборadioактивные воды ядерных реакторов сбрасывались в озеро Кызыл-Тяш (водоем № 2), а с завода Б непосредственно в реку Теча сливались даже растворы. Сброс был выше Кашкаровского и Метлинского прудов, которые расположены перед искусственно созданным на реке Теча водоемом 10 (рис. 7) [57, 58]. Следовательно, в реку Теча, вытекающую из озера, поступали радионуклиды не только с радиохимического завода, но и с проточных промышленных

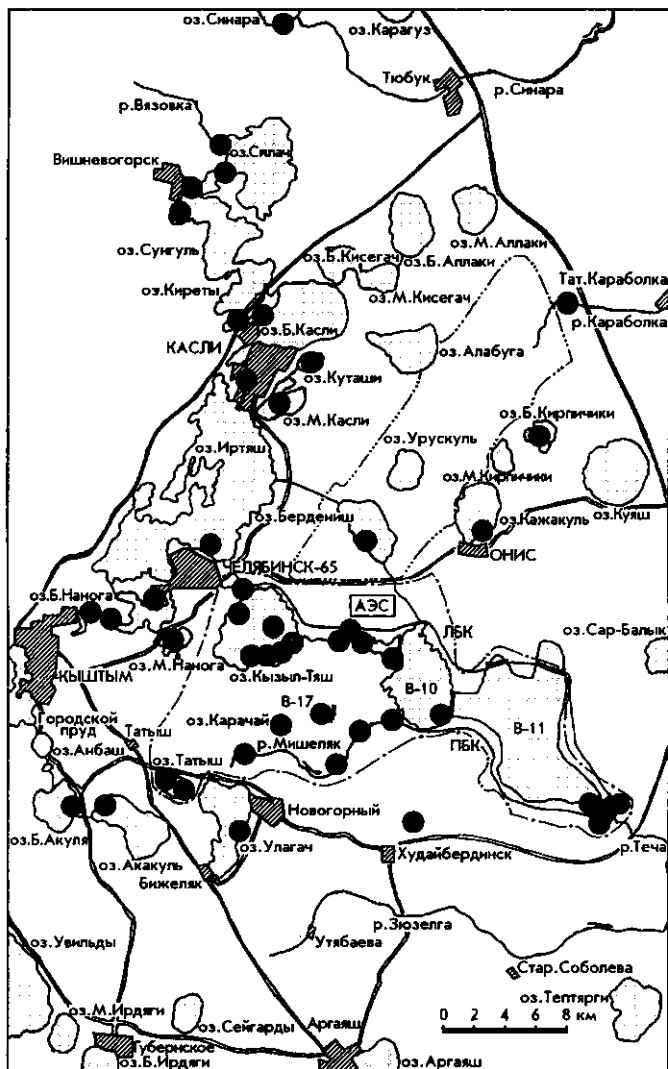


Рис. 7. Схема расположения пунктов контроля (●) водных объектов:

— — зона наблюдений; ---- — санитарно-защитная зона восточнорульского радиоактивного следа; — санитарно-защитная зона Плутониевого комбината; ОНИС — Опытная научно-исследовательская станция, ЛБК и ЛБК — правобережный и левобережный каналы; буквой В с номером обозначены искусственные водоемы; АЭС — строящаяся Южно-Уральская атомная станция с реакторами на быстрых нейтронах (БН-800)

уран-графитовых реакторов «А», АИ и трех АВ*. Однако сброс примерно 3 млн. Ки с марта 1950 г. до конца 1951 г. целиком считался вкладом завода Б [58]. Радиоактивные сбросы завода Б в реку Теча частично были предусмотрены проектом, а в значительной мере определялись непредвиденными и аварийными ситуациями. В частности, из-за неизученности сорбции плутония и продуктов деления в проекте не предусматривались десорбция оборудования и другие виды технологических процессов, связанных с увеличением объемов сбрасываемых растворов. Протечки из-за коррозии основного оборудования приводили к сбросу радиоактивности не только в емкости хранилища (комплекс С) завода Б, но и в реку Теча. По указанию руководства ПГУ комиссия, возглавляемая директором ИФП членом-корреспондентом А.П. Александровым, установила, что значительная часть сбросов, содержащих большое количество радионуклидов, в открытые водоемы не предусматривалась технологическим процессом, они были аварийными.

После заполнения в 1949 г. хранилищ (комплекс С) высокоактивными отходами возникла неразрешимая проблема. Точно так же, как на первом промышленном реакторе в конце 1948 г., на заводе Б к концу 1949 г. нужно было выбирать: либо продолжать набирать плутоний, либо остановить завод Б, прекратив сбросы радиоактивных отходов в реку Теча². Решение было принято. Нарботка плутония продолжалась. Мероприятия по ликвидации сброса активных вод в реку Теча рассматривала специальная комиссия под председательством члена-корреспондента АН СССР И.Е. Старика, которая одобрила предложение комбината, поддержанное Минздравом СССР, об использовании бессточного озера Карачай для сброса радиоактивных растворов. Материалы комиссии И.Е. Старика были согласованы с И.В. Курчатовым, А.П. Александровым, Б.Г. Музруковым и Г.В. Мишенковым. С 28 октября 1951 г. основная часть сбросов завода Б стала направляться в озеро Карачай и лишь 100–200 Ки/сут продолжало поступать в реку Теча. Из-за загрязнения реки и прибрежной территории радиационному воздействию подверглись 124 тыс. чел., проживавших в пойме реки на территории Челябинской и Курганской областей. Большие дозы облучения (до 170 бэр) получили 28 тыс. чел. Было зарегистрировано 935 случаев заболеваний хронической лучевой болезнью. Около 8 тыс. чел. были отселены из 21 населенного пункта.

В табл. 11 приведены данные о заболеваниях и онкологической смертности и облученного, и необлученного населения, проживавше-

* Реактор АВ-1 был введен в эксплуатацию 15 июля 1950 г., АВ-2 — 6 апреля 1951 г., АИ — 22 декабря 1951 г., АВ-3 — 15 сентября 1952 г.

² По действующей тогда методике расчета предельно допустимых сбросов в речные системы, допускался сброс продуктов деления в реку Теча приблизительно до 1000 Ки/сут.

го в двух районах Челябинской области [58]. Характерно, что у жителей этих районов (даже необлученных) заболеваемость и смертность существенно отличаются.

Таблица 11

Заболеваемость злокачественными новообразованиями в 1955–1982 гг. и онкологическая смертность (на 100 тыс. чел.) среди населения, облучившегося на реке Теча рядом с комбинатом «Маяк» [57]

Район Челябинской области	Категория жителей	Заболеваемость злокачественными новообразованиями	Онкологическая смертность
Кунашакский	Облученные	228,6	144,9
	Необлученные	158,6	114,1
Красноармейский	Облученные	319,4	215,4
	Необлученные	307,9	177,2

Сравнивая эти данные с показателями онкологических заболеваний людей, живущих вблизи металлургических или обычных химических предприятий, можно заметить еще большие разбросы. Так, число онкологических заболеваний людей, живущих вблизи Челябинского электрометаллургического комбината, на 100 тыс. чел. составило [58]:

1985 г.	958
1987 г.	1097
1989 г.	1114

В отличие от производственного персонала проживающее на загрязненных территориях население в значительной степени подвергается и внутреннему облучению. При потреблении загрязненной воды, молока и других продуктов облучаются клетки костного мозга, стенки толстого кишечника, поверхность костей и другие ткани. Работники Института биофизики изучили, например, средние уровни облучения костного мозга для жителей различных населенных пунктов вдоль реки Теча на расстоянии >200 км*. По мнению специалистов, клетки костного мозга являются тканью, наиболее чувствительной к радиационному повреждению, и их надо рассматривать в качестве критического органа. В табл. 12 для сравнения приведены данные об облучении различных органов жителей 4 выселенных населенных пунктов и поселка Муслюмово, где жители не выселялись.

Из сильно облучившихся жителей, проживающих вдоль реки Теча (28 тыс. чел.), более половины (73%) получили эффективные эквивалентные дозы <20 бэр. Около 12% получили дозы >50 бэр и

* Постановлением правительства в 1958 г. около 200 км по реке Теча были отпесены к санитарно-охранной зоне. Около искусственно созданных там водоемов санитарно-защитная зона составляет 134 км².

примерно 8% >100 бэр. Как и производственный персонал, в единичных случаях жители могли получить дозу 300–400 бэр.

Таблица 12

Средние эквивалентные дозы облучения различных органов и эффективные дозы для жителей на различных расстояниях (вдоль реки Теча) от радиохимического завода

Населенный пункт	Расстояние от места сброса, км	Эквивалентная доза облучения, бэр				Эффективная эквивалентная доза, бэр
		Клетки костного мозга	Поверхность кости	Стенки толстого кишечника	Прочие органы и ткани	
Метлино	7	164	226	140	127	140
Теча-Брод	18	127	148	119	115	119
Асаново	27	127	190	104	90	100
Надырово	48	95	180	62	44	56
Муслюмово	78	61	143	29	12	24

В начальный период работы радиохимического завода средняя эффективная эквивалентная доза для жителей Челябинской области, проживающих в районах по реке Теча, составила 32 бэр, Курганской области – 7 бэр.

В результате принятых позднее мер сброс радиоактивных жидких отходов в реку Теча был прекращен. Однако после сброса в 1949–1952 гг. 76 млн. м³ сточных вод с активностью (по β -излучению) 2,75 МКи в илах реки Теча содержится значительное количество сравнительно долгоживущих радионуклидов (^{90}Sr и ^{137}Cs). Содержание их за 30 лет уменьшилось всего в 2 раза за счет распада. По мнению ряда комиссий, илы реки Теча (в верхнем течении) надо относить к категории твердых радиоактивных отходов со всеми вытекающими требованиями по их захоронению. Все эти отходы сконцентрированы в санитарно-защитной зоне комбината, в которую включены искусственно созданные водоемы № 10 и 11 (см. рис. 7). В табл. 13 приведено содержание ^{90}Sr и ^{137}Cs в воде и донных отложениях водоемов, находящихся в санитарно-защитной зоне.

Радиационная обстановка контролируется Опытной научно-исследовательской станцией и Лабораторией охраны окружающей среды комбината. Вблизи водоема № 10 продолжается строительство Южно-Уральской АЭС. Работа АЭС частично позволит, используя в технических целях слабозагрязненную воду водоемов № 10 и 11, обеспечить реабилитацию территории этого сложного региона [59].

Нельзя не остановиться на последствиях радиационной аварии на заводе Б 29 сентября 1957 г., когда взорвалась одна из емкостей хранилища радиоактивных отходов. Из 20 МКи радионуклидов, находившихся в емкости, 18 МКи осело на территории промышленной площадки комбината, а 2 МКи рассеялось по территории Челя-

Таблица 13

Загрязненность водоемов санитарно-защитной зоны ПО «Маяк», Ки/л [58]

Номер водоема	Площадь, км ²	Объем, млн. м ³	В воде		В илах	
			⁹⁰ Sr	¹³⁷ Cs	⁹⁰ Sr	¹³⁷ Cs
2	19	83	$1,1 \cdot 10^{-8}$	$4,5 \cdot 10^{-9}$	$1,3 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-5}$
6	3,6	17,5	$3,7 \cdot 10^{-10}$	$2,0 \cdot 10^{-11}$	$3 \cdot 10^{-7}$	$3,9 \cdot 10^{-5}$
9	0,25	0,4	$1,7 \cdot 10^{-3}$	$1,2 \cdot 10^{-2}$	0,3	1,4
10	16,6	76	$3,5 \cdot 10^{-7}$	$8,6 \cdot 10^{-9}$	$3,5 \cdot 10^{-6}$	$1,5 \cdot 10^{-1}$
11	44	217	$5,1 \cdot 10^{-8}$	$2 \cdot 10^{-11}$	$1,3 \cdot 10^{-6}$	$1,3 \cdot 10^{-7}$
17	0,17	0,33	$7 \cdot 10^{-4}$	$4 \cdot 10^{-6}$	0,12	$3,3 \cdot 10^{-2}$

бинской и Свердловской областей, образовав восточно-уральский радиоактивный след площадью около 1 тыс. км². Из этой площади санитарно-охранная зона, включая Восточно-Уральский государственный заповедник, соответствующими постановлениями правительства определена в 200 км². Кроме того, на Опытной научно-исследовательской станции для проведения соответствующих работ было закреплено право пользования землей площадью 49,3 км² (см. рис. 7). Проведенными после аварии исследованиями было установлено, что на загрязненных территориях получили облучение свыше допустимых годовых уровней около 260 тыс. чел. С наиболее загрязненных участков переселено >10 тыс. жителей. На всей промышленной площадке комбината в первые часы после взрыва, до эвакуации работающих и находящихся на территории, в результате прохождения радиоактивного облака подверглось разовому облучению до 100 бэр >5 тыс. чел. [57]. В период ликвидации последствий этой аварии с 1957 по 1959 г. примерно 30 тыс. работников комбината, строительно-монтажных организаций, военно-строительных частей получили дозу радиационного воздействия >25 бэр.

В первые 10 лет освоения плутониевого производства на комбинате «Маяк» самоотверженный труд сопровождался переоблучением производственного персонала и населения, проживающего в прилегающих к санитарно-защитной зоне поселках и деревнях. Значительные территории и большое количество водоемов бассейна реки Теча требуют соответствующей реабилитации. Часть людей ушла из жизни, обеспечивая надежный щит отечества, невольно участвуя в гонке вооружений. Радиохимический завод Б уже давно остановлен, но последствия его работы будут долго проявляться на значительной территории Южного Урала.



Первый завод В по производству ядерных зарядов

Одна из самых драматических страниц истории ядерного оружия, по-видимому, была связана с созданием металлургической промышленности плутония. Для изготовления ядерного взрывного устройства необходимо получить высокочистый металлический плутоний. Площадка размещения этого наиболее режимного завода выбиралась специальной комиссией в начале 1947 г. Комиссию, в которую входил И.В. Курчатов, возглавлял министр внутренних дел С.Н. Крутков. Завод было решено строить на месте складов боеприпасов ВМФ у железнодорожной станции Татыш недалеко от г. Кыштым [41]. Через 2 года в феврале 1949 г. завод В начал производственную деятельность.

О становлении металлургии плутония, технологии литья и изучении свойств плутония и его сплавов можно судить по воспоминаниям В.С. Емельянова [11, 59]. И.В. Курчатов и В.С. Емельянов предложили директору ИОНХа академику И.И. Черняеву, крупнейшему специалисту по работе с малыми количествами веществ (металлы платиновой группы), приступить к изучению свойств плутония. И.И. Черняеву обещали предоставить в распоряжение небольшое количество плутония — шарик диаметром в полмиллиметра (металлурги такой шарик из металла называют «корольком») [59]. Тогда было неизвестно, как выглядит плутоний, при какой температуре плавится, хрупок он или пластичен, какие физические и химические свойства имеет. Этот элемент в ничтожных, импульсных, количествах нарабатывали только на циклотроне. Позднее, после пуска реактора Ф-1, к работам по изучению свойств плутония был максимально подключен НИИ-9 — основной технологический институт ПГУ*. Первые миллиграммовые количества плутония были выделены к 1947 г. в НИИ-9 (установка № 5) из урановых блоков, облученных в реакторе Ф-1.

В начальный период НИИ-9 был головным институтом в ПГУ и по добыче урана, включая гидрометаллургию. Впоследствии был создан специальный институт НИИ-10 — ВНИИХТ.

Тогда металлурги приступили к работе уже с «реальным» плутонием.

Технология для завода В разрабатывалась под научным руководством НИИ-9.

Первая очередь завода В была предназначена для получения металлического плутония и изделий из него для первой советской атомной бомбы. Вторая очередь подготавливалась для получения изделий из ^{235}U .

Заказчиком деталей из плутония для первой атомной бомбы кроме руководства ПГУ и научного руководителя всего атомного проекта И.В. Курчатова был и научный руководитель КБ-11 Ю.Б. Харитон.

Для концентрации усилий в 1947 г. в НИИ-9 был создан специальный отдел В под руководством А.А. Бочвара, ранее работавшего в Институте цветных металлов и золота и Институте металлургии АН СССР. А.А. Бочваром была разработана теория получения пластичных материалов, и уже в 1946 г. он был избран академиком АН СССР. Вся его дальнейшая работа в НИИ-9 сначала руководителем отдела, а затем директором была в основном связана с изучением кристаллизации, литейных свойств металлов и сплавов, рекристаллизации и жаропрочности, металловедения урана и плутония. В отдел В вошли три лаборатории:

- радиохимическая под руководством академика И.И. Черняева, директора ИОНХа;
- металлургическая, в задачу которой входило получение металлического плутония; возглавил лабораторию профессор А.Н. Вольский;
- металловедения и металлообработки под руководством профессора А.С. Займовского.

Уже в августе 1947 г. на основании первых работ на установке № 5 и других данных проектно-конструкторское бюро и специалисты отдела В НИИ-9 разработали



**АНДРЕЙ
АНАТОЛЬЕВИЧ
БОЧВАР**
(1902–1984) –

начальник отдела В,
с 1952 г.

директор НИИ-9,
академик с 1946 г.



**ИЛЬЯ
ИЛЬИЧ
ЧЕРНЯЕВ**
(1893–1966) —
начальник
лаборатории
отдела В НИИ-9,
академик с 1943 г.

технологии аффинажного завода по очистке концентрата плутония, состоявшего в основном из фторидов плутония и лантана (конечного продукта радиохимического завода Б). В основу технологической схемы был положен принцип сочетания различных способов очистки для получения высокочистого плутония. В сентябре 1947 г. проектное задание было представлено на утверждение в ПГУ и в НИИ-9 приступили к разработке проекта.

На установке № 5 плутоний выделяли до середины 1948 г. В отдельных урановых блоках, облученных в реакторе Ф-1, содержались лишь микрограммовые количества плутония, которые передавались в различные лаборатории для исследования физических и химических свойств плутония — элемента, отсутствующего в природе. Об огромной химической и радиационной опасности этого элемента стало известно позже. В «больших» количествах были доступны соединения плутония с другими элементами, в том числе гидроксиды, фториды, нитраты, хлориды, оксалаты.

В лаборатории И.И. Черняева разрабатывались два технологических процесса для завода В: аффинаж концентрата фторидов лантана и плутония; аффинаж азотнокислого раствора, содержащего двойные ацетаты натрия, урана и плутония.

Сложности, с которыми столкнулись другие лаборатории отдела В, связаны в основном с изучением свойств металлического плутония и его взаимодействием с различными элементами. Условия чрезвычайной секретности создавали дополнительные трудности в проведении работ. Как отмечают авторы исследований [60, 61], первое сообщение о достижениях советских ученых по изучению взаимодействия плутония с различными элементами было сделано сотрудником НИИ-9, крупнейшим в стране специалистом по физике

металлов членом-корреспондентом АН СССР С.Т. Конобеевским на специальной сессии АН СССР 1–5 июля 1955 г. Было определено, что чистый плутоний представляет собой металл с температурой плавления 640°C и температурой кипения 3227°C . По своей структуре и свойствам он сильно отличается от многих металлов. В интервале температур от комнатной до температуры плавления плутоний проходит через шесть аллотропических модификаций (табл. 14). Необычным является то, что плотность металлического плутония сильно изменяется с температурой: при $310\text{--}450^{\circ}\text{C}$ она составляет $14,7\text{ г/см}^3$, а в интервале температур от комнатной и примерно до 120°C — $19,82\text{ г/см}^3$. При таких изменениях плотности становится очевидным, что получение однородного (без трещин) металла из его расплава практически невозможно.

Таблица 14

Свойства плутония [60, 61]

Фаза	Структура	Температурный интервал существования, $^{\circ}\text{C}$	Температура фазового перехода, $^{\circ}\text{C}$	Объемное изменение при фазовом переходе, %	Плотность, г/см^3
α	Моноклинная	<119	122	11,0	19,82
β	Моноклинная объемно-центрированная	119–218	206	3,5	17,70
γ	Ромбическая грани-центрированная	218–310	319	7,0	14,70*
δ	Кубическая грани-центрированная	310–450	451	-0,5	15,92
η	Тетрагональная объемно-центрированная	450–472	476	-3,0	16,00
ϵ	Кубическая центрированная	472–640	640	—	16,52

* При 235°C — 17,14 [61].

Из-за α -распада плутоний в компактном виде самонагревается, так как кинетическая энергия α -частиц превращается внутри куска металла в тепловую. Установлено, что плутоний выделяет тепло — $1,923 \cdot 10^{-3}$ Вт/г и для куска плутония массой 50 г температура поверхности будет на $5\text{--}10^{\circ}\text{C}$ выше температуры окружающей среды. Способность плутония к саморазогреву сейчас обрастает разного рода легендами. Ю.Б. Харитон и Ю.Н. Смирнов описывают, как А.П. Александров в 1949 г. покрывал никелем полусферы из металлического плутония и убеждал в Челябинске 40 генералов из КГБ и Специального комитета, что горячим может быть только плутоний [62]. Известный журналист В.Губарев приводит даже такой «факт»: когда И.В. Кур-

чатов, П.М. Зернов и Ю.Б. Харитон в начале 1949 г. привезли Сталину «...небольшой, десяти сантиметров в диаметре, блестящий плутониевый шарик... Сталин осторожно коснулся ладонью шара:

— Да, теплый. И всегда теплый?

— Всегда, Иосиф Виссарионович. ...Сталин дал согласие на проведение испытаний. В мае 1949 г. Курчатов отбыл на полигон»* [63].

До мая 1949 г. такого количества плутония в нашей стране просто нельзя было получить, так как в шарике диаметром 10 см должно находиться 8 кг плутония с заданными, труднодостижимыми свойствами. Завод В в начале 1949 г. только осваивал технологию его получения. Кроме того, шарик из 8 кг плутония в определенных условиях может даже разрушиться из-за достижения критической массы на мгновенных нейтронах, т.е. произойдет его разброс из-за нейтронной вспышки [64]. Оказалось, что плутоний сильно корродирует, легко образует аэрозоли. Из-за высокой токсичности попадание плутония в организм человека представляет особую опасность. Поэтому работы с плутонием должны проводиться в герметичных перчаточных боксах или специально оборудованных герметичных камерах. Известно все это стало позднее, а в начальный период работы с плутонием в лабораториях НИИ-9 техника безопасности была на низком уровне. Не на должном уровне она была и в начальный период работы различных технологических отделений в цехах заводов строящегося на Южном Урале Плутониевого комбината (объекты А, Б, В). Правда, в НИИ-9 перерабатывались незначительные количества плутония и продуктов деления, суммарная радиоактивность которых составляла всего несколько кюри. На заводах же Б и В в растворах, нерастворимых осадках и всякого рода отходах, а также в изделиях из металлического плутония радиоактивность исчислялась многими десятками тысяч кюри.

Низкотемпературные модификации плутония (α -, β - и γ -фазы) обладают сложной кристаллической структурой низкой симметрии. В этих фазах сильно выражена анизотропия коэффициента термического расширения. Так, этот коэффициент γ -фазы по одной из осей кристалла равен $+84,3 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, а по другой $-19,7 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$. Это приводит к тому, что при охлаждении из расплава получается не слиток, как у подавляющего большинства металлов, а порошок металлического плутония.

Наличие шести аллотропических модификаций ниже температуры плавления, значительные объемные изменения и высокая химическая активность делают очень сложной технологию получения изделий из плутония. Исследователи свойств плутония и его сплавов отмечали: работа с ним в обычных условиях практически невозможна. Для обеспечения безопасных условий работы с плутонием советские

* Ю.Б. Харитон отрицает визит к Сталину с плутониевым шариком.

ученые разработали специальные приемы и методы исследования, дающие возможность получать однородные сплавы даже в небольших количествах (десятки и сотни миллиграммов) [61]*.

Сотрудники отдела В металлурги А.Н. Вольский, С. Трехсвятский, В. Соколов, Я. Стерлин и другие перед пуском завода В получили первый «королек» плутония, а металловеды лаборатории А.С. Займовского с привлечением других лабораторий НИИ-9 интенсивно изучали его свойства [60, 61]. В силу низкой пластичности α - и β -фаз объемные изменения, происходящие при охлаждении плутония, приводят к появлению в нем внутренних напряжений, микротрещин и снижению плотности. В виде порошка и мелкой стружки плутоний пирофорен при комнатной температуре и легко загорается на воздухе [61]. Однако на этом трудности работы с плутонием не кончаются. Из-за тугоплавкости и высокой реакционной способности плутония литейные формы для него можно было изготавливать из весьма редких и дорогих материалов. Наиболее пригодны для этих целей тантал, вольфрам, оксиды или фториды кальция, оксиды магния и церия. При литье необходимо свести до минимума окисление плутония в процессе его плавления и разливки, а это требует надежного высокого вакуума в технологическом оборудовании, включая плавильные печи. При успешном решении этих вопросов остаются не меньшие трудности, связанные с предотвращением растрескивания отливок из плутония в процессе их охлаждения [61]. Большие затруднения возникают и при обработке плутония давлением. При низких температурах (α -фазе) плутоний из-за высокой хрупкости с трудом поддается деформации. Лишь при δ -фазе (310–450°C) плутоний особо пластичен и может подвергаться всем видам обработки давлением: прессованию, ковке, штамповке, вытяжке и т.д. Однако при охлаждении нужно пройти три наиболее опасных фазовых превращения с изменением плотности плутония. Поэтому проблемы коробления и растрескивания остаются. Как при литье, так и при высокотемпературной обработке плутония давлением необходим высокий вакуум или инертная атмосфера, а также тщательный выбор материалов для пресс-инструмента.

Стало очевидным, что свойства плутония затрудняют его использование в чистом виде. Поэтому проблема легирования и изучения сплавов и соединений плутония стала с самого начала одной из важнейших. Очень ценными легирующими добавками являются элементы, позволяющие фиксировать при комнатной температуре пластичную δ -фазу, свободную от отмеченных недостатков чистого плутония [60, 61]. Так, легирование плутония танталом, цирконием

* Подробно эти трудности изложены Л.П. Сохиной, длительное время работавшей сначала на заводе В, а затем руководителем ЦЗЛ комбината № 817 [65, 66].

и гафнием позволяет значительно улучшить свойства плутония. Например, в сплавах плутония с цирконием (3,9–22,9 ат.%) при комнатной температуре фиксируется δ -фаза, если применить ускоренное охлаждение этих сплавов из области температур δ -фазы. К настоящему времени сплавы плутония изучены так же подробно и полно, как и сплавы большинства основных технических металлов. Раньше значительная часть данных бралась из иностранных источников. Из более чем 60 диаграмм состояния двойных сплавов плутония, указанных в работе [61], четвертая часть — из иностранных источников. Среди них сплавы с кобальтом, цинком, галлием, кадмием и др. Легирующие добавки наряду с захватом нейтронов уменьшают и плотность плутония. В ряде случаев это приводит к существенному возрастанию критической массы и увеличению массы плутония в конечных изделиях. Так, для сферы из ^{239}Pu с плотностью 19,25 г/см, окруженной слоем бериллия толщиной 5,22 см, критическая масса сферы из плутония составляет 5,43 кг [64]. Если же плотность ^{239}Pu составляет 15,8 г/см, то в аналогичных условиях (толщина бериллия 5 см) критическая масса уже равняется 7,48 кг. Для сферы из плутония плотностью 19,25 г/см, окруженной отражателем нейтронов из бериллия разной толщины, критическая масса может изменяться более существенно:

Толщина отражателя						
из бериллия, см	5,22	8,17	13	21	32	
Критическая масса						
плутония, кг	5,43	4,66	3,93	3,22	2,47	

С этими данными необходимо считаться не только при выборе конструкции заряда из плутония, но и при всех видах обработки и хранения плутония.

На радиохимическом заводе Б при переработке облученного урана природного обогащения* только конечные продукты, очищенные от урана и продуктов деления, имеют концентрацию плутония, достаточную для образования самопроизвольной цепной ядерной реакции. На заводе В образование такой реакции возможно практически на всех операциях технологического процесса. Поэтому проблема ядерной безопасности для этого завода связана, в первую очередь, с контролем количеств плутония в каждом аппарате, контейнере и трубопроводе, в каждой емкости или плавильной печи. При этом надо учитывать, что в емкостях может быть плутоний в осадках, растворе или другой форме. Значения критических масс делящихся материалов на различных стадиях технологического процесса различаются.

* Впоследствии на заводе перерабатывали ядерное топливо с исходным обогащением ^{235}U от 2 до 80%.

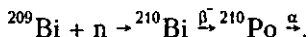
Из-за небольших значений критических масс металлургические процессы на заводе В должны были проводиться на оборудовании малых размеров, с малым количеством плутония. Не меньшие ограничения были и у радиохимиков завода В при переработке различных растворов, нерастворимых осадков, накапливаемых в оборудовании, и отходов, содержащих плутоний, так как минимальная критическая масса плутония тогда была неизвестна, существовали лишь расчетные данные. Только в 1951 г. определили, что при концентрации плутония 20–40 г/л в определенных условиях критическая масса была немного больше 500 г. Неточности лабораторных анализов, ошибки в показаниях приборов или просто невнимательность персонала могли привести к превышению установленных тогда безопасных норм загрузки 100–150 г. Поэтому необходимо было контролировать суммарное количество плутония в каждом аппарате и трубопроводе, учитывать накопление осадков, содержащих плутоний, во всех передаточных емкостях. Выполнить все это было в первые годы работы очень трудно, превышение установленных норм загрузки оказывалось неизбежным, особенно часто — при работе с растворами. Поэтому на заводе В и нередко были аварии — самопроизвольные цепные реакции.

В сферической емкости с отражателем, содержащей азотнокислый раствор плутония с концентрацией 38,4 г/л, экспериментальное минимальное значение критической массы составляло 510 г плутония. На заводах Б и особенно В такие концентрации плутония образовывались часто, а раствор мог принять форму, близкую к сферической, в различных емкостях при операциях перемешивания, добавления реагентов и т.д. Наличие осадков и нерегулярные промывки оборудования могли усугубить проблему.

О дополнительных требованиях к конечной продукции завода В

Одним из главных теоретических вопросов при разработке конструкции атомной бомбы было время протекания ядерной реакции при взрыве. Сила взрыва зависит от числа нейтронов, высвобождаемых в ходе цепной реакции. Развитие же реакции требует времени. Длительность всего процесса исчисляется миллионными и даже стомиллионными долями секунды. Разработчики столкнулись с новыми областями естествознания. В работе [34] приводятся слова академика Ю.А. Трутнева: «Нам приходится иметь дело с физическими явлениями, которые невозможно воспроизвести в лабораторных условиях. Десятки, сотни миллионов градусов, давление — миллионы атмосфер, плотность — сотни тысяч граммов в 1 см³, времена — стомиллионные доли секунды».

При медленном сближении делящегося материала для достижения критической массы ядерного взрыва не произойдет, а получится «нейтронная» вспышка, хлопок с разбросом ядерного материала. Поэтому конструкция ядерного заряда должна быть такой, чтобы предотвратить разброс делящегося вещества и «обрыв» цепной реакции. Необходимо обеспечить также условия, при которых в реакцию вступит как можно больше делящегося материала. В этом случае произойдет ядерный взрыв. В работе руководителя Манхэттенского проекта по созданию ядерного оружия в США генерала Л. Гровса [67], опубликованной в нашей стране в 1964 г. (в основном руководителем филиала лаборатории № 2 КБ-11 это было известно еще из данных разведки в 1945 г.), практически были сформулированы примерные требования к деталям из делящихся материалов, используемых в атомных бомбах*. Наиболее простая конструкция бомбы основывалась на использовании для создания критической массы делящегося материала так называемого ствольного метода. По этому методу одна подкритическая масса делящегося материала направлялась как снаряд к другой подкритической массе, игравшей роль мишени, и это мгновенно создавало сверхкритическую массу, которая должна была взорваться. Сброшенная на Хиросиму бомба была сделана именно по такому принципу. И в нашей первой атомной бомбе использовались полушария из плутония, которые изготавливались в Челябинске-40 и имели специальные покрытия для защиты от коррозии [62]. В материалах разведки, которые лично изучали Ю.Б. Харитон и И.В. Курчатов, не только перечислялись данные о форме плутониевого заряда, но и приводились сведения о других частях, составляющих бомбу. Подробно описана конструкция полоний-бериллиевого источника нейтронов («инициатора»), который вставлялся внутрь плутониевого заряда. Период α -полураспада ^{210}Po около 140 сут, поэтому он примерно в 4 тыс. раз более эффективен, чем радий-бериллиевый источник нейтронов, так как у радия $\text{T}_{1/2} \sim 1600$ лет. Для получения ^{210}Po на реакторе А облучали специальные блоки, изготовленные из висмута:



В указанном «инициаторе» сложной конструкции и малых размеров на поверхности бериллия находилось 50 Ку ^{210}Po .

Далее в обобщенных материалах НКГБ (документ в адрес Специального комитета от 18 октября 1945 г., подписанный наркомом В.Н. Меркуловым) указывалось: «Активным материалом атомной

* В работе [68] есть ссылка, что постановлением правительства за подписью Сталина срок испытания плутониевой бомбы был назначен на начало 1948 г., а урановой — на середину 1948 г., но эти сроки оказались пересальными.

бомбы является элемент плутоний фазы дельта с удельным весом 15,8. Он изготовлен в виде полого шара, состоящего из двух половинок, которые, как и внешний шарик «инициатора», спрессовываются в атмосфере никелькарбонила. Внешний диаметр шара 80–90 мм. Вес активного материала вместе с «инициатором» 7,3–10 кг. ... В одном из полушарий имеется отверстие диаметром 25 мм, служащее для ввода «инициатора» в центр активного материала, где он укреплялся на специальном кронштейне... Отверстие закрывается пробкой, также изготовленной из плутония». Непросто было И.В. Курчатову, Ю.Б. Харитону и другим ученым-физикам, а также руководителям ПГУ и комбината, научному руководителю завода В.А.А.Бочвару принять технологию деталей из плутония и утвердить их размеры. Еще сложнее было изготовить их с заданными свойствами. Однако это было сделано к августу 1949 г.

Авторы работ [3, 68] отмечают: «С места своего изготовления в Челябинске-40 плутониевый шарик был доставлен сначала в Арзамас-16, а затем вывезен непосредственно на Семипалатинский полигон».

Плутониевые полушария для первой бомбы покрывали никелевой пленкой. В специальном цехе на заводе В было создано отделение покрытий деталей из плутония. Первым руководителем его была А.В. Дубинина. В разработке технологии покрытий участвовали сотрудники НИИ-9.

В США разрабатывались и другие конструкции ядерного заряда. Так, Л. Гровс отмечал, что вторая конструкция атомной бомбы была основана на использовании явления сходящегося внутрь взрыва (имплозии). В этом случае поток газов от взрыва обычного взрывчатого вещества направляется на расположенный внутри делящийся материал и сжимает его до тех пор, пока он не достигнет критической массы. По этому принципу была содана бомба «Толстяк», сброшенная на Нагасаки. Теорию бомбы имплозионного (взрывного) типа разработал в США С.Н. Неддермейер, и проделанная им работа с конца 1943 г. явилась основой для создания бомбы из плутония на основе имплозии (рис. 8). Этот метод имеет большое преимущество перед первым – ствольным методом, так как свойства плутония затрудняют его использование в первом методе [67].

Из рис. 8 видно, что число, форма и размеры деталей из плутония могут изменяться, даже если они изготовлены в виде полого шара. Это обстоятельство и должно было учитываться при выборе технологии и проектировании оборудования для металлообработки плутония. В целом атомная бомба – это сложнейшее устройство, так как при сближении ядерных деталей нужно было обеспечить высокую синхронность. Очевидно, что размеры «сферического» заряда из одних делящихся материалов во много раз меньше внешних размеров атомной бомбы.

Не только в США метод имплозии стал основным при изготовлении деталей из делящихся материалов для атомных бомб. В нашей стране также был разработан оригинальный взрывной вариант ядерного заряда. Среди его создателей — сотрудники КБ-11 Л.В. Альтшуллер,

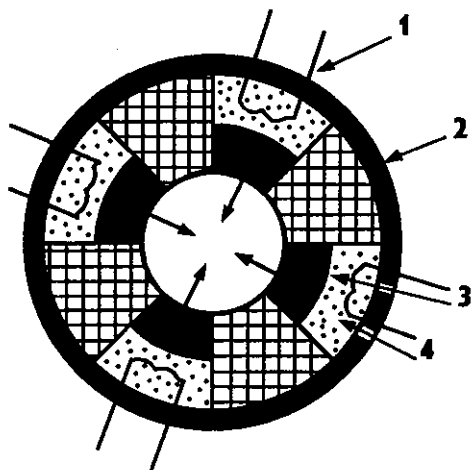


Рис. 8. Принципиальная схема атомной бомбы взрывного типа с кодовым названием «Толстяк»:

1 — электрический запал; 2 — оболочка; 3 — ядерное взрывчатое вещество (^{235}U или ^{239}Pu); 4 — химическое взрывчатое вещество

Е.И. Забабахин, Я.Б. Зельдович и др. Разработанный нашими учеными ядерный заряд был успешно испытан в 1951 г. По мнению Ю.Б. Харитона и Ю.Н. Смирнова, это было второе, более эффективное испытание ядерного оружия в нашей стране [62]. Ныне в музее ядерного оружия в Арзамасе-16 макеты двух изделий — с использованием американской схемы и схемы, испытанной в 1951 г., — стоят рядом и являют собой разительный контраст. Бомба на основе нашей схемы, будучи почти в 2 раза легче копии американской бомбы, получилась одновременно в 2 раза мощнее ее. Кроме того, существенно меньшим оказался и диаметр бомбы благодаря оригинальному инженерному решению по обеспечению имплозии, предложенному В.М. Некруткиным. О замечательных качествах Виктора Михайловича, его таланте и драматической судьбе вспоминает Л. Фомичева [63].

По мере усовершенствования ядерного оружия конструкции зарядов из делящихся материалов существенно изменялись. Это приводило к необходимости изменения технологии на заводе В. Уже в 1958 г. в нашей литературе публиковались схемы конструкций ядерных и термоядерных бомб (рис. 9) с большим числом деталей по сравнению с вышеописанной бомбой (см. рис. 8) в 1,5 раза. Масса каждой части — детали из делящегося материала — даже при наличии отражателя нейтронов меньше критической. Меньше критической массы были и суммарные массы используемых в первой отечественной

бомбе плутониевых полусфер. Для повышения коэффициента использования делящегося вещества части заряда окружены отражателями нейтронов. Соединение частей заряда и увеличение плотности Pu или ^{235}U достигается путем внешнего взрыва заряда из обычного взрывчатого вещества, осуществляемого от специального взрывного устройства [69].

У термоядерной бомбы энергия взрыва на 80–90% обусловлена реакцией синтеза (кроме дейтерия и трития использовался и литий). Для схемы, показанной на рис. 9, в, энергия взрыва высвобождается в результате последовательного развития реакций деления (1-я ступень), синтеза (2-я ступень) и деления урана (3-я ступень). Под действием термоядерных нейтронов, энергия которых (около 14 МэВ) приблизительно в 7 раз превышает пороговую энергию деления ^{238}U , он интенсивно делится. В этом виде оружия основная энергия выделяется делением ^{238}U . Ссылки на правомерность этих же принципов устройства оружия описаны в статьях В.И. Ритуса, Ю.А. Романова и др. [70]. Одновременно В. Жучихиным были детально рассмотрены конструкция сферического заряда взрывчатого вещества первой атомной бомбы и размещение плутония в ней. Внутри сферического заряда взрывчатого вещества вставлялся алюминиевый шар с плутониевым зарядом в центре [68].

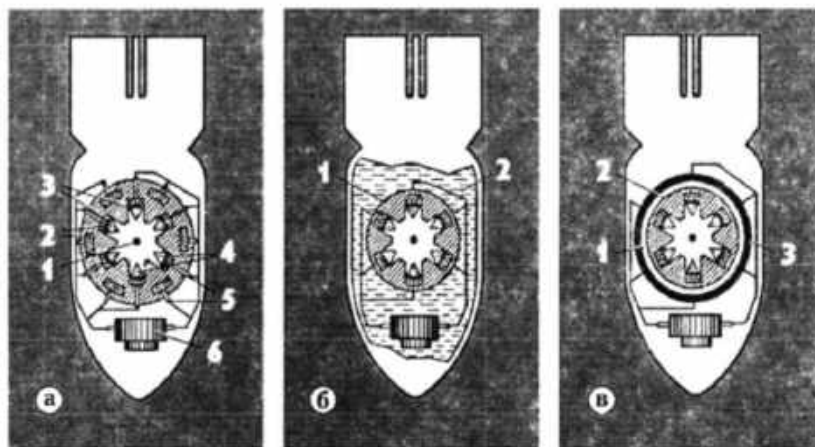


Рис. 9. Принципиальные схемы бомб[69]:

а – атомной: 1 – источник нейтронов, 2 – обычное взрывчатое вещество, 3 – отражатель нейтронов, 4 – делящееся вещество, 5 – детонаторы, 6 – взрывное устройство; **б** – термоядерной (водородной): 1 – атомный заряд-детонатор (атомная бомба того же устройства, что и на рис. а), 2 – смесь дейтерия и трития; **в** – ядерной типа деление–синтез–деление: 1 – дейтерид лития, 2 – атомный заряд-детонатор (как и на рис. б), 3 – ^{238}U

Кроме определенной формы, массы и размеров деталей из делящихся материалов необходимы были определенный изотопный состав и чистота плутония. Методики контроля разрабатывались в ряде институтов и утверждались на Аналитическом совете ПГУ (председатель А.П. Виноградов, секретарь П.Н. Палей), который был создан 26 октября 1946 г. В решении Аналитического совета от 14 июля 1947 г. были определены допустимые примеси в металлическом плутонии — конечной продукции завода В и утверждены основные методы их контроля.

В процессе отработки технологии состав примесей уточнялся. Уместно отметить, что их нежелательность связана не только с захватом нейтронов и увеличением критической массы, но и с качеством — эффективностью плутония в конечных изделиях. В реакторе образуется смесь изотопов плутония, основными из которых являются ^{239}Pu , ^{240}Pu , ^{241}Pu . В зависимости от времени нахождения в реакторе изменяются глубина выгорания и изотопный состав плутония. Оружейный плутоний практически состоит из изотопа с массой 239. С увеличением глубины выгорания накапливаются изотопы с массой 240 и 241. Хорошо известно, что энергетический плутоний, содержащийся в смеси изотопов плутония (10–20% ^{240}Pu), не используется в оружии. Объясняется это тем, что у ^{240}Pu период спонтанного (самопроизвольного) деления ядер во много раз меньше, чем у ^{239}Pu . При таком делении образуется значительное число нейтронов, чем ослабляется эффективность ядерного заряда. Если у ^{239}Pu период полураспада при спонтанном делении ядер равен $5,5 \cdot 10^{15}$ лет и выход нейтронов составляет $3,2 \cdot 10^{-2}$ нейтр./г·с, то у ^{240}Pu период спонтанного деления равен $1,27 \cdot 10^{11}$ лет и выход нейтронов — $1 \cdot 10^3$ нейтр./г·с [71]. Поэтому даже наличие 1% ^{240}Pu в деталях из ^{239}Pu создает нейтронный фон больше, чем от всего изделия из одного ^{239}Pu . Особо нежелательными элементами в деталях из плутония являются примеси легких ядер, при взаимодействии с которыми α -частицы, испускаемые изотопами плутония, также увеличивают нейтронный фон. Ранее приводились количественные данные о выходе нейтронов при взаимодействии с ядрами таких элементов, как литий, бериллий, бор, фтор, натрий, азот, кислород, алюминий, кремний, хлор [72]. Все эти элементы присутствовали при ведении технологических процессов, а их примеси в плутонии ухудшали его качество. Содержание таких элементов, как бор, бериллий, литий, фтор, ограничивалось значениями от 10^{-2} до $10^{-5}\%$. ^{240}Pu имеет период α -полураспада 6,6 тыс. лет (а ^{239}Pu — 24,4 тыс. лет) и почти в 4 раза увеличивает нейтронный фон от примесей легких металлов. Поэтому роль различных методов лабораторного контроля за ходом технологических процессов на заводе В на всех стадиях производства была очень велика.

Разработка проекта создания завода В и освоение технологии

В разработке проекта завода В участвовали НИИ-9, ИОНХ, а затем вновь организованный проектный институт ГСПИ-12. Конечная продукция радиохимического завода Б была входной продукцией завода В. Состав этой продукции не был однозначным, так как технология завода Б непрерывно совершенствовалась.

Первые работы над проектом завода В также вели специалисты НИИ-9 в составе проектно-конструкторского бюро, в котором с октября 1946 г. находился и Ленинградский филиал НИИ-9, проектировавший предприятия уранодобывающей промышленности.

Постановлением правительства от 8 февраля 1948 г. на базе проектно-конструкторского бюро НИИ-9 в системе ПГУ был организован под руководством Ф.З. Ширяева специальный проектный институт — ГСПИ-12. Вначале, из режимных соображений, институт назывался Московской проектной конторой. Ее главной задачей в тот период и было создание проекта завода по получению металлического плутония и изделий из него, а также изделий из металлического высокообогащенного ^{235}U . После начального организационного периода руководителем конторы был назначен заместитель министра цветной металлургии А.В. Флоров, а главным инженером — Ф.З. Ширяев.

Как уже отмечалось, первая очередь завода В располагалась в складских помещениях вблизи железнодорожной станции Татыш^{*}. Практически это была отдельная промышленная площадка, примыкающая к территории двух основных заводов Плутониевого комбината, также расположенного в междуречье рек Теча—Мишеляк (см. рис. 7). В музее ПО «Маяк» и в обзоре [73], опубликованном в связи с 45-летием комбината, приведены различные материалы о начальном периоде освоения завода В. Приказом от 3 марта 1948 г. на базе одноэтажных зданий барачного типа (здания 4, 8 и 9) был организован опытно-промышленный комплекс завода.

В начале 1949 г. после ремонта в здании 9 было создано опытно-промышленное производство для переработки растворов плутония, поступающих с завода Б (рис. 10). 26 февраля 1949 г. в 12 ч ночи первый конечный продукт завода Б поступил на переработку в химическое отделение здания 9. Первую партию принимали начальник цеха Я.А. Филиппев, начальник химического отделения И.П. Мартынов в присутствии Б.Г. Музрукова, Г.В. Мишенкова, И.И. Черняева. Это отделение И.И. Черняев назвал «стаканным», так как продукт завода Б разливался в платиновые стаканы и в них проводились

* В 1947 г. был проведен ремонт этих складов с высоким качеством отделки. Как требовал А.А. Бочвар, стены должны были быть зеркально гладкими, позволяющими легко отмывать их от распыленных продуктов [66].

дальнейшие технологические операции. В отделении работали в основном женщины. Первыми начальниками смен были выпускницы Горьковского и Воронежского университетов Ф.А. Захарова, А.С. Костюкова, М.Я. Трубчанинова, З.А. Быстрова. Металлургическое отделение цеха возглавлял К.Н. Чернышев [66]. Здание 9 было превращено в химическую лабораторию с деревянными вытяжными шкафами, а оборудование было переносным — кроме платиновых стаканов и фильтров, а также золотых воронок почти ничего не было. Все операции выполнялись вручную, никакой механизации не предусматривалось, не было специальных приспособлений для работы с радиоактивными веществами [73].



Рис. 10. Цех по получению плутония (здание 9)

Уместно привести первые впечатления об условиях работы в здании 9 М.А. Баженова*: «Пройдя КПП, я очутился перед обычным бараком, каких повидал в своей жизни немало. Барак назывался цех № 9. Мое рабочее место — комната 5х9, стол, стул, посередине обычный вытяжной шкаф, заставленный бачками, баночками, стаканами. За шкафом стояли металлические контейнеры с продуктом, накрытые фанерка-

* М.А. Баженов впоследствии работал руководителем лаборатории завода В, а затем возглавлял радиохимические подразделения Научно-исследовательского института атомных реакторов (НИИАР) в г. Димитровграде.

ми» [73]. Иногда эти контейнеры, накрытые фанерками, использовали вместо недостающих стульев. Так тогда трудились работники комбината вместе с учеными, создавшими технологию завода В. Ведущие ученые страны жили в коттедже барачного типа, расположенном в 150 м от здания 9. Среди них — А.А. Бочвар, И.И. Черняев, А.С. Займовский, А.Н. Вольский, А.Д. Гельман, В.Д. Никольский, В.Г. Кузнецов, Л.И. Рузинов и др.

По проектам Московской проектной конторы и проектно-конструкторского бюро НИИ-9 строительство новых цехов завода началось в 1948 г. и велось в две очереди. Первая очередь предусматривала превращение конечных растворов завода Б в металл и получение изделий из металлического плутония. Вторая очередь была введена после получения высокообогащенного ^{235}U . Часть основного оборудования в реконструированных зданиях была поставлена на завод В из НИИ-9. Как вспоминает ветеран отрасли Н.П. Финешин, работавший с начала организации Московской проектной конторы, значительная часть оборудования изготавливалась на машиностроительных заводах других ведомств и сверхсрочно поставлялась для строящегося завода В. Некоторое оборудование изготавливалось в ремонтно-механическом цехе комбината (начальник П.И. Филимонов), в мастерских монтажных организаций, а также непосредственно в цехах самого завода Б.

Основной вклад в проектирование завода В внесли работники ГСПИ-12 Н.П. Алексахин, П.Я. Беляев, Л.Р. Дулин, А.Л. Тараканов, Л.Т. Житченко, В.Ф. Леонтьев, А.Г. Грицкова, Д.С. Майоров, Б.А. Васильев, а также Ф.З. Ширяев, С.А. Петросян, Н.И. Бочков, И.И. Китаев и др.

Позднее по проектам ГСПИ-12 усилиями больших коллективов были сданы в эксплуатацию первые цехи уникального производства совершенно с другими условиями работы персонала.

К началу 1949 г. упорядочилась структура завода. Директором был назначен З.П. Лысенко (умер вскоре после пуска завода)^{*}, начальником 2-го производства — П.И. Дерягин, который до этого был главным инженером завода В. Главным инженером завода В был назначен Ф.М. Бреховских, работавший до середины 1948 г. главным инженером завода № 12, а затем заместителем директора комбината по металлургии. Подготовка к пуску завода В обеспечивалась и контролировалась руководителями комбината Б.Г. Музруковым, Е.П. Славским и заместителем главного инженера комбината Г.В. Мишенковым. Как отмечали ветераны завода Л.П. Сохина, В.В. Мясников, Г.И. Немцев, И.А. Мышьянов, фактическое руководство производством тогда осуществляли ученые И.В. Курчатов, А.А. Бочвар, И.И. Черняев,

^{*} Постановлением правительства от 13 сентября 1949 г. (№ 3847–1604) было установлено обеспечение семьи З.П. Лысенко с пожизненными пенсиями жене и матери покойного, а также дочерям до окончания институтов.



**ГЕОРГИЙ
ВАСИЛЬЕВИЧ
МИШЕНКОВ**
(1907—1965) —
заместитель
главного инженера,
затем
главный инженер
и директор
комбината № 817.
С февраля 1960 г. —
главный
инженер 4 ГУ
Минсредмаша СССР

А.Н. Вольский, А.С. Займовский, Л.И. Русинов, А.П. Александров, В.И. Кутайцев, А.Г. Самойлов. Большая роль в организации аналитического контроля на производстве принадлежала ГЕОХИ.

Во главе с академиками А.А. Бочваром и И.И. Черняевым на комбинат для пуска завода В прибыли отдельные бригады под руководством ученых (А.Н. Вольский, А.С. Займовский, А.Д. Гельман и др.) из специалистов ИОНХ, НИИ-9, ИФХ и других институтов. Так, под руководством члена-корреспондента АН СССР А.Н. Вольского в бригаде металлургов находились кандидат технических наук В.С. Соколов и молодые инженеры Ф.Г. Решетников, И.В. Будаев, Я.М. Стерлин. Под руководством профессора А.С. Займовского на завод В был командирован автор методов по обработке металла давлением А.Г. Самойлов². В возглавляемой им группе работали конструкторы М.С. Пойдо и Ф.И. Мысиков, инженер-литейщик И.Д. Никитин, а также молодые специалисты завода В Б.Н. Лоскутов и Г.М. Нагорный. Работа этой группы была завершающей. Созданное в институте оборудование не позволяло обеспечить однородный нагрев прессуемой массы металла (сначала имитатора). Тревога охватила не только А.Д. Бочвара и А.С. Займовского. Руководители Б.Л. Ванныков, А.П. Завенягин, И.В. Курчатов, Б.Г. Музруков и Е.П. Славский, отвечающие перед Специальным комитетом за выпуск плутониевого заряда, по-видимому, были еще

¹ Ф.Г. Решетников — физикохимик и металлург, член-корреспондент АН СССР. С 1946 г. работает во ВНИИМс.

² А.Г. Самойлов работал на Московском комбинате твердых сплавов, а с 1946 г. работает во ВНИИМс. Лауреат Ленинской и четырехжды Государственной премий, заслуженный изобретатель России, член-корреспондент АН СССР.

более встревожены, так как приближался август 1949 г. За короткий срок оборудование было переделано и на имитаторе из алюминия стали получать качественные изделия. К этому времени от металлургов, возглавляемых А.Н. Вольским, поступил плутоний в виде небольших плавленных цилиндриков. Их масса составляла только 110% массы двух конечных тонкостенных полусфер из плутония, которые после горячего прессования должны были пройти и механическую обработку. Уместно привести воспоминания А.Г. Самойлова об этих решающих для создания атомной бомбы технологических операциях с количествами плутония, даже превышающими минимальную критическую массу [38]: «Прессование было поручено произвести мне. Народу в цехе было мало, физики у пресса поставили свои приборы, а сами удалились, остались только ответственные за эти работы: А.А. Бочвар, А.С. Займовский, А.Г. Самойлов, М.С. Пойдо, И.Д. Никитин, Ф.И. Мыськов. Я взялся за рычаг гидравлического пресса. У всех в это время было гнетущее состояние, каждый обдумывал свое бытие: будет ли он жив или разложится на атомы? Все думали, не ошиблись ли физики, учли ли они все факторы, влияющие на увеличение критмассы, не произойдет ли ядерный взрыв во время горячего прессования металла? Все замолкли, наступила тишина. Пуансон медленно стал опускаться в аппарат, давление на манометре постепенно стало возрастать и дошло до требуемого показателя. Прессование благополучно закончено, нагревательная система отключена. Все радостно зашевелились, засуетились, громко заговорили. Собралось начальство. Некоторое затруднение испытали при извлечении изделия из разъемной пресс-



**АНТОН
НИКОЛАЕВИЧ
ВОЛЬСКИЙ**
(1897–1966) —
начальник
лаборатории
отдела В
НИИ-9,
академик с 1960 г.

формы, и здесь нам помог своей могучей силой Ефим Павлович Славский, изделие с его помощью без каких-либо повреждений было извлечено из пресс-формы, выглядело оно блестящим. С большой тщательностью и точностью обточили его при помощи специального приспособления на станке. Операция обточки была очень ответственная, трудоемкая и требовала большого внимания, осторожности и смекалки, чтобы не запороть изделия в брак. При обработке изделия резанием неоценимую услугу оказал сотрудник нашей группы Михаил Степанович Пойдо. ...Все мы тогда дошли до высшей критической точки нервного напряжения, тогда все казалось не таким, как было в действительности. Вдруг А.П. Завенягин решил, что изделие по сферичности запорото, и весь свой гнев он обрушил на М.С.Пойдо, который выслушал эти обвинения молча, не сказав в свою защиту не единого слова. После ухода А.П. Завенягина Михаил Степанович мужественно продолжал вести обработку изделия до конца и сделал его с большой точностью на примитивном оборудовании. Несколько раз после этого я просил Андрея Анатольевича Бочвара обратиться к А.П. Завенягину, чтобы он как-то смягчил этот инцидент, но, к сожалению, разговор А.А. Бочвара с А.П. Завенягиным не состоялся. По-видимому, тогда А.П. Завенягину можно было сделать скидку на напряженность обстановки. Огромная ответственность, независимо от занимаемого положения, лежала на каждом из нас. Случай с М.С. Пойдо мог привести к двойной трагедии, так как без М.С. Пойдо мы наверняка бы запороли изделие».

Эти примеры не единичны и указывают, что данные разведки, полученные по атомной бомбе, в создании целого ряда производств не играли значительной роли.

Ведущие цехи, лаборатории и отделения завода В укомплектовывались кадровыми службами ПГУ и комбината, специалистами НИИ-9 и других институтов. Приказом по базе 10 20 июня 1949 г. были назначены начальниками цехов: № 1 — Я.А. Филиппцев, № 4 — В.С. Зуев, № 10 — Д.И. Баринев, № 10а — Н.И. Грошев, № 12 — В.И. Малышев. Начальником лаборатории завода В был назначен И.Н. Рождественский. (Впоследствии руководителями этой лаборатории были А.М. Спринц, А.Т. Первушин, М.А. Баженов и В.В. Сорокин.) В основном цехе, возглавляемом Я.А. Филиппцевым, в химическом отделении осваивали технологию И.П. Мартынов, Е.Д. Вандышева, З.И. Исаева, Н.И. Скрыбина и др., в металлургическом отделении — В.А. Карлов, В.Т. Семов, А.С. Никифоров*, П.В. Кулямин, В.Т. Каминская и др. Вместе с работниками институтов коллектив цеха уже 26 февраля 1949 г. принял с завода Б для переработки первую партию продукта — плутония. Состав исходного раствора

* А.С. Никифоров (1926–1992) — академик, с 1984 по 1992 г. директор ВНИИМ.

из-за ненадежности аналитического контроля был мало изучен. При работе с первыми порциями растворов плутоний и «размазывался», и сорбировался на фильтрах в осадках, оставался в промывных водах и т.д. Технологический регламент не мог быть создан на первых этапах работы завода.

Только в мае 1949 г. И.И. Черняевым, В.Д. Никольским и А.Д. Гельман была составлена первая Временная технологическая инструкция, утвержденная главным инженером комбината Е.П. Славским. В слож-



***Академик А.А. Бочвар среди ветеранов завода В
и участников научной конференции***

нейших условиях на заводе В химики и металлурги вели работы по получению первого металлического плутония. В важнейшем цехе получения изделий из металлического плутония — № 11 начальниками отделений работали: литейного — С.И. Бирюков, обработки давлением — Б.Н. Лоскутов, покрытий — А.В. Дубинина, обработки резанием — А.И. Мартынов. В цехе был создан ряд лабораторий для контроля необходимых параметров в конечных изделиях, выпускаемых заводом. Руководителями лабораторий металлофизики, металлорведения, рентгеновской, нейтронно-изотопной и других работали Л.И. Русинов, М.Д. Дерезинов, В.Д. Бородич, В.А. Коробков, Ф.П. Бутра, В.В. Калашников, Г.Т. Залесский, который впоследствии (с 1 апреля 1959 г.) стал директором завода. До 1959 г. (с 23 сентября 1949 г.) директором

завода был Л.А. Алексеев. Ведение каждого технологического процесса осуществлялось под научным руководством специалистов НИИ-9, ИОНХ и других институтов при постоянном контроле руководства ПГУ и комбината. Не только научный руководитель завода А.А. Бочвар, но и научный руководитель проблемы И.В. Курчатов и особенно научный руководитель разработки конструкции первой атомной бомбы Ю.Б. Харитон и заведующий лабораторией ИОНХ В.Г. Кузнецов контролировали выполнение требований КБ-11, НИИ-9 и ИОНХ, предъявляемых к изделиям из плутония. Под руководством А.А. Бочвара в цехах № 4 и 11 работали с металлическим плутонием и осуществляли научное руководство следующие работники НИИ-9: Н.И. Иванов — начальник цеха № 11, М.С. Пойдо — научный руководитель цеха № 4, А.С. Займовский — научный руководитель цеха № 11, А.Г. Самойлов — научный руководитель по изготовлению первых деталей из металлического плутония, В.В. Калашников — начальник лаборатории, заместитель начальника цеха № 11, Ф.П. Бутра — начальник лаборатории рентгеноструктурного анализа в цехе № 11. В работах по покрытиям изделий из плутония никелем принимала участие Е.В. Конопасевич, а в изготовлении деталей — И.Д. Никитин. В тяжелых условиях отработки технологии на заводе В в бригаде А.А. Бочвара работали кроме названных специалистов сотрудники НИИ-9 и других институтов: Е.С. Иванов, Ф.И. Мыськов, В.И. Кутайцев, А.А. Жулькова, И.В. Походзей, Н.И. Назарчук, И.П. Селицкий, М.А. Карнышев, Б.А. Голубков.

В августе 1949 г. на комбинате были изготовлены полусферы из плутония. Это обеспечило успешное испытание на полигоне в Семипалатинске первой атомной бомбы 29 августа 1949 г. в 6 ч 30 мин по местному времени [54, 74].

Перечислить всех участников пуска и освоения производства металлического плутония и изделий из него невозможно. Среди них были И.Г. Евсиков, А.С. Никифоров, Г.Т. Залесский, В.В. Мясников, С.И. Бирюков, Г.М. Нагорный, К.Т. Василенко, И.С. Головин, И.В. Михеев, Г.А. Алешина, Л.П. Сохина, З.А. Исаева, Ф.П. Кондрашова, С.М. Фролов, Б.Н. Сериков, Е.Д. Вандышева, З.А. Быстрова, И.И. Ощепков, Д.А. Олоничев, Д.И. Виноградов, М.И. Грибанова и многие другие работники комбината, НИИ-9, ГСПИ-12 и других институтов, а также строители и монтажники, участвовавшие в создании завода В.

Совершенствование технологических процессов получения плутония было одной из главных задач НИИ-9 и научного руководителя завода В академика А.А. Бочвара. На комбинате регулярно проводились научно-технические конференции, на которых давалась оценка деятельности и производителей, и научных работников различных институтов. Намечались планы научных исследований, которые контролировались аппаратом Минсредмаша.

Современное поколение задает вопрос о нравственных позициях ученых — создателей самого мощного оружия — мучили ли их угрызения совести при создании столь смертоносного оружия? С таким вопросом обратился журналист А. Артизов в последнем интервью к Е.П. Славскому — одному из первых организаторов отрасли, работавшему министром Средмаша с 1957 по 1986 г. Е.П. Славский ответил: «Я что-то не заметил подобных настроений. Если бы такие мотивы присутствовали, мы наверняка не смогли бы в сжатые сроки одолеть огромную бездну проблем и создать ядерное оружие. Ученые работали не за страх, а за совесть, целиком отдавая себя делу. Советских ученых не надо было уговаривать или запугивать, они понимали, как нужен стране ядерный щит» [8]. С таким же настроением работали тогда и большинство инженеров, техников, рабочих и служащих над важнейшей программой в стране, программой № 1.

Последствия внутреннего облучения

Значительно в большей степени, чем на промышленном реакторе, был подвержен комбинированному воздействию радиации, то есть внешнему β -, γ - и внутреннему облучению инкорпорированным (поглощенным) плутонием, производственный персонал заводов Б и особенно В. В производственных помещениях, особенно в начальный период работы, находилось значительное количество аэрозолей, содержащих плутоний и попадавших с вдыхаемым воздухом в организм человека.

В первые годы работы с плутонием о внутреннем облучении ничего не было известно и оно не учитывалось. Как позднее было показано, попадание плутония в организм человека в значительных количествах увеличивает вероятность заболеваний раком легких. Исследования, проводившиеся в течение 20 лет за состоянием здоровья 2346 работников предприятий, имеющих в организме плутоний (1832 мужчины и 514 женщин), позволили установить не только суммарное многолетнее внешнее облучение, но и дозы внутреннего облучения легких. В филиале Института биофизики Минздрава в Челябинске-40 профессором В.Ф. Хохряковым с сотрудниками были разработаны методы косвенной дозиметрии плутония [75]. У персонала накопленная коллективная доза составила $5,03 \cdot 10^5$ бэр. Наблюдение за 20 лет выявило 45 случаев заболеваний раком легких. Спонтанное (ожидаемое) заболевание раком легких городского населения страны, рассчитанное с учетом возраста и пола, составило бы лишь 32,6 заболевания. Из данных работы [75] также следует, что для групп производственного персонала с общей дозой облучения <400 бэр наблюдаемое число заболеваний даже ниже ожидаемого числа спонтанных раков легких, рассчитанных исходя из средних показателей для городского населения страны. В то же время авторы отмечают, что с дозой, превосхо-

дядей 400 бэр, фактическое число случаев заболевания в 2,6 раза превысило ожидаемое. В рамках принятых моделей нет однозначной связи между числом заболеваний и дозой облучения. Число заболеваний зависит от динамики формирования дозы.

Получены также экспериментальные данные по накоплению плутония у населения, проживающего в Челябинске-40 и других регионах [76]. Установлено, что в Челябинске-40, расположенном рядом с санитарно-защитной зоной, за 45 лет работы комбината у населения города, проживающего там с 1950 г., накопление плутония примерно в 30 раз превышает содержание плутония глобального происхождения*.

В табл. 15 приведены сопоставительные данные о содержании плутония у населения других регионов, полученные на основании анализа образцов органов тканей, взятых при вскрытии 60 взрослых жителей Челябинска-40 и 128 жителей 17 районов Гомельской области, умерших в 1990–1991 гг. Результаты математической обработки приведенных в табл. 15 данных указывают на большие трудности определения содержания плутония в организме населения, даже проживающего вблизи предприятий атомной промышленности.

Таблица 15

Содержание плутония в организме человека [76]

Регион	Содержание плутония, Бк	Число проб
Челябинск-40*	$3,75 \pm 1,45$	35
Гомельская область	$0,27 \pm 0,15$	126
Уфа (1981 г.)	$0,11 \pm 0,07$	5
Западная Европа (ФРГ, Великобритания, 1981–1982 гг.) ²	$0,07 \pm 0,12$	30

* У людей, проживающих в городе с 1950 г.

² Рассчитано на основании зарубежных данных.

С учетом публикаций Международной комиссии радиологической защиты авторы работы [76] анализируют риск смерти от рака, вызванного облучением для проживающих в Челябинске-40. Предполагая, что накопление плутония происходит с постоянной скоростью, они показывают, что в организме родившегося в городе и проживающего в нем 70 лет накопится 6,6 Бк плутония, которые дадут эффективную эквивалентную дозу облучения за жизнь (70 лет) лишь 0,33 бэр. На 100 тыс. таких жителей можно ожидать возникновение по этой причине 16,5 случая заболеваний злокачественными новообразованиями. Учитывая, что в других регионах содержание плутония в организме много меньше, авторы работы [77] делают вывод о невозможности определить влияние поглощенного плутония на частоту возникновения злокачественных но-

* Глобальное содержание плутония обусловлено наличием его в атмосфере от испытаний ядерного оружия в США, СССР, Великобритании, во Франции и в Китае.

вообразований. Следовательно, только у профессионалов, длительное время работающих с источниками излучений, сейчас обнаруживается хроническая лучевая болезнь и повышенная смертность. На примере старейшего персонала Плутониевого комбината это четко прослеживается. Из 2,9 тыс. чел. (мужчин), начавших работать на комбинате в 1948–1953 гг., при постоянном наблюдении за ними (99,6 тыс. чел.-лет) число умерших составило 39,3%, а у более молодых из 2249 поступивших на работу мужчин в 1954–1958 гг. при наблюдении 68,9 тыс. чел.-лет число умерших составило 21,8%. Данные о количестве доз радиационного воздействия у этих групп можно видеть из табл. 16. Жизненный статус наблюдаемых работников был известен на 1 января 1991 г.

Таблица 16

Характеристика уровней комбинированного радиационного воздействия [77]

Показатель	Начало работы 1948–1953 гг.	Начало работы 1954–1958 гг.
Число работников, имеющих данные индивидуального фотопленочного контроля, в том числе с суммарной дозой внешнего γ -облучения, рад:		
<100	2527	2006
≥ 100	832	1557
Средняя доза внешнего γ -облучения для всех лиц, имеющих индивидуальный фотопленочный контроль, рад	1695	449
Число работников, имеющих данные биофизического обследования, в том числе с содержанием плутония в организме, нКи:		
ниже порога чувствительности	178,3±3,6	58,2±1,2
<40	269	248
≥ 40	23	32
Среднее содержание плутония в организме для всех лиц, имеющих данные биофизического обследования, нКи	79	117
	167	99
	266,5	96,5

Из 11 групп локализации новообразований у работников, подвергшихся внешнему и внутреннему радиационному воздействию, только в 2 группах онкологическая смертность мужчин радиохимического производства достоверно выше, чем у мужского населения страны. Это группы локализации новообразований: трахея, бронхи, легкие; лимфатические и кроветворные ткани, причем такая закономерность установлена только для лиц, получивших суммарную дозу внешнего γ -облучения >100 сГр.

Данные табл. 16 однозначно подтверждают недооценку воздействия внутреннего облучения, так как у лиц, начавших работу на комбинате в 1948—1953 гг., только у 10% работающих проведены биофизические обследования.

Приведенные дозы облучения, полученные персоналом заводов Б и В, а также первого промышленного реактора, особенно в 1948—1951 гг., говорят о трагедии, о больших дозах облучения, нанесших непоправимый вред здоровью человека. Службы дозиметрии создавались в условиях, когда с радиационными последствиями не очень считались, а воздействие внутреннего облучения совсем было неизвестно. Кроме того, при работе с открытыми источниками радиоактивности и особенно с такими α -излучателями, как радий, радон, плутоний и полоний, воздействие внутреннего облучения в те годы и не могло контролироваться, а понятия «лучевая болезнь» не существовало. Впоследствии были установлены предельные значения попадания указанных элементов в организм человека. Были установлены допустимые концентрации радионуклидов в воздухе рабочей зоны для защиты такого критического органа человека, как легкие, Ки/л: $^{239}\text{Pu} - 9 \cdot 10^{-16}$, $^{226}\text{Ra} - 2,59 \cdot 10^{-14}$, $^{210}\text{Po} - 9,3 \cdot 10^{-14}$. С этими продуктами работали не только в РИАНе, ЛИПАНе и других институтах, но и на ряде предприятий ПГУ.

Перед учеными, физиками и химиками стояла одна задача — скорей, скорей соорудить ядерный реактор и получить долгожданный плутоний, уйти от монополии США на ядерное оружие. И вместе с рядовыми сотрудниками, работавшими на указанных объектах, раньше срока уходили из жизни создатели, первопроходцы освоения ядерной энергии. Такие имена начинателей этого великого дела, как И.В. Курчатов, В.Г. Хлопин, И.Е. Старик, Б.А. Никитин, И.И. Черняев, А.Н. Вольский, Г.Н. Флёров, И.С. Панасюк, и много, много других должны навсегда остаться в памяти благодарных им людей. Это они вместе со своими сподвижниками в институтах и эксплуатационным персоналом объектов А, Б и В обеспечили получение плутония для ядерного оружия. В первую очередь их усилиями под руководством Специального комитета и ПГУ было сделано все необходимое, чтобы предотвратить третью мировую войну. Наш народ получил возможность жить в мире после войны 1941—1945 гг. вот уже 50 лет.

После рассматривания создания первых трех важнейших для атомной промышленности заводов, построенных к 1949 г. в Челябинске-40, необходимо несколько слов сказать и о городе, в котором жили, живут и работают наши первопроходцы.

Город был построен на юго-восточном берегу прекрасного озера Иртяш рядом с деревней Старая Теча. За озером по линии старых промышленных уральских городов Касли, Кыштым, Карабаш, Миасс проходят невысокие горы Южного Урала. Вишневые горы

имеют максимальную высоту 396 м, а южнее Потанины находятся горы Сугомак — 480 м и Егоза — 607 м. Этот район давно осваивался. Еще в 1885 г. было открыто месторождение бурого железняка, который использовался Каслинским заводом. В 1902 г. выдающийся русский геолог А.П. Карпинский открыл Кызыл-Тяшское месторождение корунда. Небольшой корундовый завод, построенный рядом с деревней Старая Теча, перерабатывал этот корунд в песок и изготавливал бруски, оселки и другую продукцию, пока не выработал месторождение. Это относительно далекое прошлое. А сейчас Челябинск-40 превратился в жемчужину Южного Урала и Сибири. Площадь жилой застройки города около 15 км². Городской парк культуры отдыха занимает 133 га, а на каждого жителя приходится еще 13,5 м² зеленых насаждений. У жителей города более 14 тыс. личных автомобилей, 63 торговых объекта и хорошая обеспеченность жильем. В городе прекрасный театр и несколько дворцов культуры.

Из Озерска сейчас, несмотря на определенные сложности с трудоустройством, мало кто собирается уезжать. О городе и отношении к нему его жителей лучше, чем написал местный поэт — ветеран комбината И.П. Померанцев, не скажешь. Приведем слова его песни, написанной к 40-летию комбината в 1988 г.:

Где раньше ветвистые сосны шумели,
 Да ветер гулял над просторами вод,
 И горы Уральские в даях синели —
 Прекрасный соцгород построил народ.
 Нам многим известна романтика стройки,
 Романтика новых путей и дорог,
 И первые наши жилые постройки:
 Палаточный, толевый наш городок.
 Мы помним, как город наш здесь зарождался:
 Квартал за кварталом вставали в лесах,
 Но мы не привыкли тому удивляться,
 Он рос вместе с нами, на наших глазах.
 Проспекты и парки, сады и аллеи,
 Встают силуэты высотных домов.
 Он стал нам дорожке, он стал нам милее,
 Родней и прекрасней других городов.
 Здесь выросли дети и вырастут внуки.
 Здесь жизнь наша, счастье и радость труда,
 Здесь славят Отчизну рабочие руки,
 И делают скромно большие дела.
 В уральском просторе у озера-моря,
 О Родине нашей пусть песня звенит,
 Пусть город цветущий, для нас самый лучший,
 Бессменно на вахте почетной стоит.



Завершающий этап создания первой плутониевой бомбы. Семипалатинский полигон

Ответственность за получение делящихся материалов (плутония и ^{235}U) и разработку атомной бомбы с самого начала была возложена на лабораторию № 2. Для ускорения работ в апреле 1946 г. постановлением правительства создается филиал лаборатории — специальное конструкторское бюро (КБ-11), место для которого по предложению Б.Л.Ванникова выбиралось рядом с одним из заводов боеприпасов, так как для отработки конструкции бомбы требовалось много взрывчатых веществ (ВВ). В течение нескольких месяцев под руководством заместителя министра боеприпасов П.Н. Горемыкина работала инициативная группа в составе А.П.Зернова и Ю.Б. Харитона с участием главного инженера Ленгорпроекта И.И. Никитина (будущий проектант г. Арзамас-16), выбравшая для КБ-11 территорию Саровского монастыря, носящего имя преподобного Серафима Саровского, причисленного православной церковью в 1903 г. к лику святых. Завод № 550 по выпуску снарядов для катюш, находящийся в поселке Саров Мордовской АССР (в 75 км от г. Арзамаса), впоследствии был передан вместе с поселком в состав КБ-11*.

Организационная структура вновь создаваемой промышленности постоянно совершенствовалась. Для координации работ на комбинатах № 817, 813 и в КБ-11 руководство Специального комитета в первой половине 1947 г. назначило ответственных за ход работ по основным направлениям атомной программы. На заместителя начальника ПГУ генерал-майора А.С. Александрова — специалиста по боеприпасам — возлагалась ответственность за обеспечение КБ-11 всем необходимым для разработки конструкции атомной бомбы. Другой работник Специального комитета — А.М. Петросьянц был назначен заместителем начальни-

* Первоначальный штат КБ-11 намечался из 70 научных сотрудников. Первые лаборатории размещались в одном из зданий Саровской пустыни. Вначале завод № 550 был передан в состав Управления строительства № 880 МВД СССР.

ка ПГУ, ответственным за получение высокообогащенного ^{235}U на комбинате № 813.

И.В. Курчатова назначили научным руководителем комбината № 817, а заместителя начальника ПГУ Е.П. Славского – директором этого комбината, производящего плутоний в Челябинске-40. На И.В. Курчатове осталась ответственность как за работу ЛИПАНа, так и за ход создания КБ-11. Строительство подобных объектов тогда было наиважнейшей задачей Специального комитета. Уполномоченный Совета Министров при ЛИПАНе генерал-майор Н.И. Павлов персонально контролировал ход строительства филиала и о задержках непосредственно докладывал Л.П. Берии [44]. Уместно привести распоряжение Л.П. Берии о расследовании причин задержек в строительстве КБ-11, которое было дано А.Н. Серову (МГБ): «Факты, изложенные в докладной записке Павлова Н.И. о некачественном строительстве КБ-11, нужно расследовать и виновных наказать. Расследование проведите вместе с гг. Завенягиным А.П., Зерновым П.М. и Павловым Н.И. С докладной запиской т. Павлова Н.И. ознакомить т. Ванникова Б.Л. и т. Курчатова И.В. Результаты доложите. 22 июля 1947 г. Л. Берия» [44].

Начальником управления строительства № 880 МВД СССР с мая 1946 г. в течение двух лет работал полковник А.С. Пономарев. Перевалочной базой строительства специального КБ становится станция Шатки, куда сразу же стали поступать вагоны с оборудованием [78]. Для размещения прибывающих в КБ-11 специалистов строились сборные щитовые домики, получаемые по репарации из Финляндии. Создается строжайшая режимная зона, а прием на работу в КБ-11 и строительство без допуска МГБ запрещается. Выезд работающих в зоне и членов их семей и прочих граждан практически был запрещен [78]. Были установлены сверхжесткие сроки строительства. Коллектив строителей формировался с привлечением специального контингента, как обозначались тогда в официальных документах заключенные. В 1947 г. таких привлеченных строителей было около 10 тыс. чел. Заинтересованность труда заключенных на важнейших ядерных объектах стимулировалась лозунгами и плакатами типа: «Запомни эту пару строк: работай так, чтоб снизить срок!».

Руководителями КБ-11 были назначены: П.М. Зернов – директор с конца 1946 по 1950 г. (бывший заместитель министра танковой промышленности); Ю.Б. Харитон – главный конструктор и научный руководитель КБ; К.И. Щелкин – заместитель главного конструктора^{*}.

Строятся необходимые испытательные стенды. Были отстроены площадки – полигоны, созданы собственные производственные базы – заводы № 1 и 2. Директорами этих заводов были назначены А.К. Бесарабенко и А.Я. Мальский. Изучаются материалы данных разведки о

* До перехода в КБ-11 Ю.Б. Харитон, К.И. Щелкин и Я.Б. Зельдович работали в ИХФ.



**ПАВЕЛ
МИХАЙЛОВИЧ
ЗЕРНОВ**
(1905–1964) —
директор КБ-II
с 1946 по 1950 г.

конструкции атомной бомбы. Формируются коллективы лабораторий. Во главе с Я.Б. Зельдовичем создается теоретический отдел.

Руководителям КБ-11 было известно, что в плутониевой бомбе американцы осуществляли обжатие плутониевого заряда с помощью взрыва заряда химического ВВ сферически сходящейся ударной волной [68]. Поэтому работа с ВВ была одной из самых важных. Как отмечает ветеран В.И. Жучихин, «за основу устройства фокусирующего пояса сферического заряда был взят почти правильный 32-гранник, вписываемый в сферу (сейчас по такой схеме делают лучшие футбольные мячи). Автором разработки является В.Ф. Гречишников». Нужно было экспериментально отработать технологию процесса взрыва, чтобы сферически сходящаяся детонационная волна в заряде ВВ формировалась синхронно работающими, специальными фокусирующими элементами, каждый из которых инициируется быстродействующими капсюлями — детонаторами. Далее В.И. Жучихин пишет: «Первоначально размеры элементов центральной части заряда — обжимаемых деталей из плутония — выбирались не путем поиска оптимальных значений, а скорее с помощью интуитивных решений. И только впоследствии размеры были уточнены» [68].

Режим особой секретности, в котором проводились работы, приводил к тому, что даже ответственные исполнители не могли знать исходных данных о требуемых для бомбы количествах плутония, хотя, как неоднократно отмечал Ю.Б. Харитон [29, 62], схема бомбы, размеры и форма деталей из плутония были известны. Знали об этом немногие, но руководителям Специального комитета и ПГУ, а также научному руководителю атомной проблемы

И.В.Курчатову и главному конструктору атомной бомбы они были известны еще до начала создания КБ-11. Поэтому на Южном Урале на комбинате № 817 еще до экспериментального подтверждения осуществимости цепной ядерной реакции (в лаборатории № 2 на реакторе Ф-1) уже в начале 1946 г. началось интенсивное строительство сложнейших предприятий по получению плутония и производству ядерных зарядов. Однако ученые, конструкторы и технологи, создатели этих производств, мало что могли позаимствовать из скурых разведанных данных. Поэтому усилия, которые были затрачены на строительство промышленного реактора, создание радиохимической технологии выделения плутония и получение конечной продукции комбината № 817 — металлических полусфер из плутония, покрытых никелем, были огромны.

Большие усилия нужно было приложить для выполнения ранее не предусмотренных работ и в КБ-11. Уже в январе 1948 г. Специальная комиссия в составе И.В. Курчатова, А.П. Завенягина, Ю.Б. Харитона, А.С. Александрова и П.М. Зернова представила в Специальном комитете проект постановления Совета Министров СССР «О плане работ КБ-11», где, в частности, предусматривался перевод в КБ-11 специалистов и ученых из других организаций: «И. Сталин после доработок подписал это постановление 8 февраля 1948 г. В итоге к августу 1949 г. все трудности были преодолены» [68]. Однако эта лаконичная запись совсем не отражает, какие усилия и кем были предприняты для разработок:

- систем автоматического подрыва заряда;
- радиодатчиков, к разработке которых вначале подключались даже НИИ и КБ Министерства авиационной промышленности, Министерства



**АЛЕКСАНДР
СЕРГЕЕВИЧ
ПОНОМАРЕВ**
(1905–1974) —
начальник
строительства КБ-11
в 1946–1948 гг.,
впоследствии
руководитель
строительства
комбината № 813,
начальник Главного
монтажного
управления
Минсредмаша



**ЮЛИЙ
БОРИСОВИЧ
ХАРИТОН** —
главный
конструктор
и научный
руководитель КБ-11,
академик с 1953 г.

промышленности средств связи и других ведомств;

- конструкции баллистического корпуса бомбы и изучения его аэродинамических характеристик;

- ряда уникальных приборов и установок.

В опубликованных в конце 1992 г. описаниях хода работ над атомной бомбой [44] Ю.Б. Харитон отмечает: «... для конструкции первой советской атомной бомбы были использованы попавшие к нам благодаря К. Фуксу и разведке достаточно подробная схема и описание первой испытанной американской атомной бомбы. Эти материалы оказались в распоряжении наших ученых во второй половине 1945 г. Когда специалистами Арзамаса-16 было выяснено, что информация достоверная (а это потребовало выполнения большого объема тщательных экспериментальных исследований и расчетов), было принято решение для первого взрыва воспользоваться уже проверенной, работоспособной американской схемой». Ю.Б. Харитон далее признает, что в условиях накаленных отношений между СССР и США в тот период и ввиду ответственности ученых за успех первого испытания любое другое решение было бы недопустимым и просто легкомысленным. Информация о разведывательных данных, принятом решении и перечень разработчиков, использующих эти данные, были строжайше засекречены. Поэтому он пишет: «Можно понять чувства здравствующих ныне ветеранов, которые первый заряд, а если сказать точно, то схему первого заряда считали тогда достижением советских ученых и конструкторов» [38]. При этом следует отметить, что принятое решение о реализации американской схемы несколько задержало разработку собственной, оказавшейся более эффективной



Рис. 11. Монастырские строения до создания КБ-11 в Сарове

конструкции. Для реализации нашей схемы потребовалось еще 2 года, и поэтому второе испытание атомной бомбы было проведено только в 1951 г.

Отработка как американской, так и отечественной схемы требовала в короткий срок провести сложнейшие и опасные эксперименты в КБ-11, а также ответственные расчеты. Как и кем это осуществлялось в КБ-11, на привлеченных предприятиях и в организациях, довольно подробно изложено в воспоминаниях первых работников Арзамаса-16 [68, 78].

Для организации экспериментальных работ и обеспечения функционирования КБ-11 кроме завода № 550 были использованы территория и здания Саровского монастыря [79]. Строились новые лабораторные корпуса, реконструировались здания монастыря, а также жилой поселок, который превратился впоследствии в современный город — Арзамас-16. Сейчас колокольня используется в качестве телевизионной башни, а здание трапезной монастыря реконструировано под городской театр (рис.11).

Учитывая особую режимность КБ-11, предстояло создать зону вокруг поселка Саров и монастыря с периметром порядка 50 км. С 17 июля 1947 г. поселок Саров был изъят из административного подчинения Мордовской АССР и исключен из всех учетных материалов. Всем работающим и проживающим было строгойше запрещено даже упоминать прежнее историческое название, и так длилось около 40 лет.



**ВЛАДИМИР
ИВАНОВИЧ
АЛФЕРОВ**
(1904–1995) —
руководитель
систем подрыва
зарядов и бомб

Под руководством К.И. Шелкина началось изучение ударной сжимаемости конструкционных материалов. Для этого надо было научиться измерять давление за фронтом детонационных и ударных волн в диапазоне от 0 до 2–5 млн. атм. Этим должны были заниматься создаваемые в КБ-11 лаборатории А.Ф. Беляева, М.Я. Васильева, Л.В. Альтшуллера, В.А. Цукермана. Создавались приборы и установки для измерения скоростей сходящихся детонационных и ударных волн. В модельных экспериментах проводились взрывы зарядов ВВ массой 10–20 кг. В 1947 г. первые работы по проведению взрывных работ с регистрацией параметров взрыва проводила группа А.Д. Захаренкова*, входящая в лабораторию М.Я. Васильева. К тому времени схема атомной бомбы и ее размеры вчерне были определены и в КБ-11 велась подробная проработка всех узлов и деталей. Основной частью бомбы был сферический заряд, инициируемый одновременно в 32 точках по наружной поверхности. Верхний слой сферического заряда состоял из фокусирующих элементов, преобразующих 32 расходящиеся детонационные волны в одну сферически сходящуюся [68]. Внутри сферического заряда ВВ должен был вставляться алюминиевый шар с плутониевым зарядом в центре. В качестве материала ВВ одной из частей фокусирующего элемента выбрали сплав тротила с гексогеном в соотношении 1:1, скорость детонации которого была 7560 м/с. В качестве ВВ второй части фокусирующего элемента была выбрана смесь бариевой селитры с другими добавками для обеспечения меньшей скорости детонации (5200 м/с). Делалось это потому, что работа фокусирующего элемента основана на разнице

* Позднее с 1968 по 1987 г. работал заместителем министра среднего машиностроения.

скоростей детонации его составных частей. Устройство элемента обеспечивает одинаковое время прохождения детонации от точки инициирования до любой точки его внутренней поверхности, несмотря на разные пути. Чем больше разница скоростей детонации частей элемента, тем он получается компактнее [68].

Для измерения всех указанных параметров, включая регистрацию несферичности фронта детонации, в КБ-11 и ИХФ разрабатывались специальные приборы и установки. Определение оптимальной технологии (соотношение компонентов ВВ) требовало проведения испытаний, для чего сверхсрочно изготавливались цилиндры диаметром 30–40 мм и высотой 100 мм. Отстрел цилиндрических зарядов проводился на площадке № 2 возле каземата, построенного в середине 1947 г. в 5 км от Саровского завода. Еще до получения на заводе В комбината № 817 первых деталей из металлического плутония в КБ-11 (к апрелю 1949 г.) были отработаны элементы фокусирующего пояса заряда первой атомной бомбы. В ходе экспериментов обнаруживались все новые эффекты. Так, теоретические расчеты Е.И. Забабахина* показали увеличение скорости детонации по мере приближения сферически сходящихся детонационных волн в центре схождения. Экспериментаторы проверяли изменение скорости детонации на разных радиусах заряда [68].

К середине 1948 г. в КБ-11 работа разных служб и подразделений была сконцентрирована на двух направлениях. Капитан первого ранга В.И. Алферов руководил разработкой схем и приборов систем подрыва зарядов, а также системы управления подрывом авиабомбы. Генерал-майор Н.Л. Духов объединил специ-



**НИКОЛАЙ
ЛЕОНИДОВИЧ
ДУХОВ**
(1904–1964) —
начальник
конструкторского
сектора

* Впоследствии работал научным руководителем института в Челябинске-70, академик с 1968 г.

алистов, разрабатывающих конструкции собственно заряда и авиабомбы, а затем возглавил конструкторский сектор. К этому времени на объект прибыли основные теоретики КБ-11 Я.Б. Зельдович и Е.И. Забабахин, а затем Е.А. Негин и Г.М. Гандельман.

Самое серьезное внимание уделялось измерению скорости движения продуктов взрыва за фронтом детонационной волны. К этой работе была подключена лаборатория, руководимая Е.К. Завойским¹. Мгновенное симметричное сжатие плутониевого заряда, окруженного зарядом ВВ, является главным условием возникновения надкритичности плутония и определяет эффективность ядерного взрыва. В такой же мере это относится и к ядерным зарядам из других специальных материалов — высокообогащенного ^{235}U и ^{233}U , искусственно получаемого из ^{232}Th .

Эффективность ядерного взрыва зависит от быстроты создания надкритичности, при этом превышение критической массы достигается как за счет соединения подкритических частей заряда из расщепляющихся материалов, так и за счет увеличения плотности этих материалов, сжимаемых давлениями в миллионы атмосфер. Разработчикам хорошо известны закономерности уменьшения критической массы с увеличением плотности плутония.

Критическая масса делящихся материалов (^{239}Pu , ^{235}U и ^{233}U) изменяется обратно пропорционально квадрату плотности, а критический объем — кубу плотности [64]. Эти закономерности и особенно увеличение плотности при сжатии тогда были неизвестны, а для теоретических оценок размера и массы ядерного заряда необходимо было знать целый ряд сечений взаимодействия нейтронов с разными материалами. Кроме того, необходимо было создать теоретические методики определения критической массы плутониевого заряда, т.е. реактора на мгновенных нейтронах, у которого, в отличие от реактора типа Ф-1, отсутствует замедлитель нейтронов. Для определения процессов, происходящих при взрыве бомбы, к работам в КБ-11 временно даже были привлечены известные в стране физики-теоретики под руководством Л.Д. Ландау², работавшего тогда руководителем теоретического отдела в ИФП. «Верно, — как пишет И.М. Халатников³, — тогда в отделе Ландау было всего два сотрудника: он и Е.М. Лифшиц (член-корреспондент с 1966 г., академик с 1979 г.), а расчеты выполнялись на примитивной технике. Как известно, первая отечественная

¹ В лаборатории № 2 — с 1947 г. Разработал метод электронно-оптической хронографии для исследования сверхбыстрых процессов (10^{-12} – 10^{-14} с), академик с 1964 г.

² В 1932–1937 гг. возглавлял теоретический отдел ХФТИ. Академик с 1946 г., член многих зарубежных академий наук, лауреат Нобелевской премии.

³ В журнале «Химия и жизнь» (1994, № 1) И.М. Халатников (член-корреспондент АН СССР с 1972 г.) излагает мотивы участия Л.Д. Ландау (с декабря 1946 г.) в расчетах по эффективности бомбы, а затем его отстранения от работ по атомному проекту.

ЭВМ «Стрела» заработала только в 1953 г. Для решения математических задач в конце 40-х гг. были созданы научные группы, которыми руководили К.А. Семендяев, А.Н. Тихонов, Н.Н. Мейман. Позднее эти группы математиков были объединены в специальный институт в Москве под руководством М.В. Келдыша» [80].

Измерения ядерных констант, необходимых для расчетов критических масс, проводились в лабораториях физических исследований под руководством Н.А. Протопопова, Г.Н. Флёрова, Д.П. Ширшова, Ю.А. Зысина. Эти лаборатории только к середине 1948 г. разместились во вновь построенном корпусе. В это время на территории КБ-11 строители сдали в эксплуатацию два трехэтажных здания и одно одноэтажное, предназначенные для проведения исследовательских работ. Число сотрудников КБ росло, увеличивалось количество научных исследований.

Данные, полученные нашей разведкой, и ориентация на американскую схему атомной бомбы позволили физикам и конструкторам плутониевого заряда (Н.Л. Духову, В.Ф. Гречишникову, Д.А. Фишману, Н.А. Терлецкому, П.А. Есину) частично избежать на начальном этапе тех трудностей и аварий, которые произошли в Лос-Аламосе при сборке и определении критических масс плутониевых полусфер [64]. Физики же КБ-11 Г.Н. Флёров, Д.П. Ширшов, Ю.А. Зысин, Ю.С. Замятин, И.А. Курилов и их сотрудники, в начале 1949 г. проводить эксперименты с критическими массами не могли, так как в 1948 г. – начале 1949 г. не было плутония для таких экспериментов. Не было тогда и высокообогащенного ^{235}U , а критические массы определялись расчетным методом на основании измеренных ядерных сечений взаимодействия нейтронов с указанными делящимися материалами.

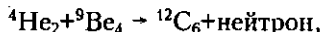
К моменту получения из Челябинска-40 плутония, необходимого для первой атомной бомбы, в КБ-11 были закончены все конструкторские разработки. Специальным комитетом, руководством ПГУ, научным руководителем урановой проблемы И.В. Курчатовым были выполнены все необходимые подготовительные работы для испытаний ядерного заряда на полигоне.

Проблемы нейтронного запала

В атомной бомбе внутри делящихся материалов размещается нейтронный запал (НЗ) – нейтронный источник, инициирующий ядерный взрыв. В КБ-11 под руководством конструкторов для разработки и изготовления НЗ была создана специальная лаборатория, которую возглавляли сначала А.Я. Апин, а затем В.А. Александрович. Как отмечают ветераны КБ-11, в 1948 г. лабораторию разместили в отдельном здании. К 1949 г. она была в состоянии изготавливать НЗ, о чем свидетельствует лаконичная запись из распоряжения Ю.Б. Харитона по результатам работы в КБ-11 Государственной комиссии: «В.А. Александровичу – в июне–июле изготовить три комплекта НЗ» [68].

Какие же работы предшествовали получению нейтронных источников для атомной бомбы? Какие исходные материалы необходимо было получить, чтобы разработать конструкцию и изготовить миниатюрные, но высокой интенсивности источники, используемые в НЗ? Кто эти исходные материалы наработывал? В значительной мере об этом и отчасти о разработке других составляющих атомной бомбы можно судить по воспоминаниям ныне здравствующих первопроходцев о работе с радиоактивными материалами, ветеранов -- технологов НИИ-9 [38].

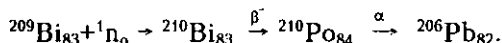
Переданная разведкой схема атомной бомбы, о которой упоминалось выше, включала не только данные об активном делящемся материале. Приводились, в частности, параметры инициатора -- источника нейтронов, указывающие, что для его создания нужно организовать получение в стране уникального радиоактивного материала -- ^{210}Po . В отличие от радий-бериллиевого источника нейтронов, в котором α -частицы (ядра гелия), испускаемые ^{226}Ra , взаимодействуя с ^9Be , обеспечивают получение нейтронов по реакции:



полоний-бериллиевый источник в тысячи раз более эффективен. Период полураспада ^{210}Po составляет около 140 сут, а у ^{226}Ra -- около 1600 лет. Поэтому такой источник более компактен и в его малом объеме можно получать интенсивные потоки нейтронов. Тогда было известно, что ^{210}Po -- один из продуктов распада радия и в принципе можно организовать его выделение из запасов радия, хранящегося в государственных фондах Министерства финансов.

Как вспоминает З.В. Ершова [38], в 1946 г. академики И.В. Курчатов и В.Г. Хлопин поручили НИИ-9 из 15 г радия-эквивалента Государственного фонда разработать технологию и выделить ^{210}Po . Препараты радия были расфасованы мелкими порциями по 100–150 мг. За 20-летний срок хранения в стеклянных ампулах было высокое давление из-за накопления радона и гелия. Руководителями работы были назначены З.В. Ершова, Д.М. Зив и В.Д. Никольский, имевшие опыт обращения с радием еще в Гиредмете. Вместе с ними в группе работало 15 чел. Работа была сверхважной, сложной и опасной, а сроки исполнения были очень короткими. «Нас торопили, но мы не могли торопиться, так как любая неосторожность могла погубить все, что мы с таким трудом добывали. ...вспоминая сейчас эту опасную операцию, можно удивляться, как мы все остались здоровы и не получили сильных поражений» [38]. Выделенный ^{210}Po использовали для приготовления полоний-бериллиевых источников нейтронов. Однако выделенного полония было мало, и эта же бригада готовила другие полоний-бириллиевые источники нейтронов.

Опыт переработки 15 г радия с продуктами распада вселил уверенность в коллектив, руководимый З.В. Ершовой, по созданию постоянно действующего производства ^{210}Po . Для получения полония в значительных количествах фактически необходимо было организовать новое производство, включающее добычу природного висмута и изготовление из него изделий — блоков для их облучения нейтронами в первом промышленном реакторе по реакции:



Затем в НИИ-9 необходимо было отработать технологию выделения полония из висмута, а в КБ-11 — его последующее использование в инициаторе бомбы.

В настоящее время известно, что работа с полонием так же опасна, как и работа с плутонием и радием. В табл. 17 приведены нормы радиационной безопасности при воздействии на легкие человека для 4 радионуклидов. Если с ураном и радием работали в РИАНе, Гиредмете, в НИИ-9 и на ряде предприятий ПГУ, а с плутонием в основном в НИИ-9 и на комбинате № 817, то полоний-бериллиевые источники для бомбы необходимо было конструировать в КБ-11, а для получения ^{210}Po , висмута и бериллия привлекать другие организации.

В описании отдельных частей атомной бомбы отмечалось, что инициатор состоит из пустотелого бериллиевого шарика, на внутренней поверхности которого имеются клинообразные выемки*. В материалах указывалось: «Плоскости всех выемок параллельны одна другой. Поверхность выемок покрыта слоем золота толщиной 0,1 мм и слоем полония. Внутри этого шарика помещен сплошной бериллиевый шарик, поверхность которого также покрыта слоем золота и полония. Полый шарик изготавливается из двух половинок, которые спрессовываются в атмосфере никель-карбонила, благодаря чему на поверхности шарика образуется никелевое покрытие». Приведем лишь отдельные размеры инициатора взрыва атомной бомбы, которые указаны в материалах разведки:

внешний радиус полого бериллиевого шарика	1,0 см
радиус основной клинообразной выемки	0,4 см
радиус сплошного бериллиевого шарика	0,4 см
число клинообразных выемок	15
количество полония на поверхности всех выемок . . .	30 Ки
количество полония на сплошном шарике	20 Ки.

* Документ разведки № 13 направлен 18 октября 1945 г. в адрес председателя Специального комитета В.Н. Меркуловым (наркомом НКГБ СССР), в котором из 10 составных частей бомбы приведены краткие описания 7 частей, включая состав и размеры ядерного заряда, отражателя (в документе называется замедлителем) из урана с внешним диаметром 230 мм, химических взрывчатых веществ и наружной оболочки бомбы из бронированной стали.

Таблица 17

Характеристики радионуклидов, определяющих радиационную безопасность работы производственного персонала [81]

Радионуклид	Период полураспада	Допустимое содержание в критическом органе (легких), мкКи	Допустимое годовое поступление в организм через органы дыхания, мкКи	Допустимая концентрация в воздухе рабочей зоны, Ки/л
^{235}U	$7,0 \cdot 10^8$ лет	0,0087	0,15	$6,0 \cdot 10^{-14}$
^{226}Ra	1600 лет	0,0036	0,062	$2,5 \cdot 10^{-14}$
^{239}Pu	24,4 тыс. лет	0,008	0,047	$9,0 \cdot 10^{-16}$
^{210}Po	140 сут	0,0073	0,23	$9,3 \cdot 10^{-14}$ *

* Наиболее опасное воздействие на желудочно-кишечный тракт.

В одной из полусфер активного материала (плутония) имелось отверстие (диаметр 25 мм), указывающее, что наружный диаметр инициатора был меньше 25 мм.

Не останавливаясь на реально созданной в КБ-11 конструкции НЗ, приведем лишь подтверждение того, что вначале специализированное производство полония осуществлялось на опытной установке при лаборатории № 11 НИИ-9 [38]. Программа получения препарата полония расширялась. Это производство было организовано в 1948 г., а исходным материалом был облученный в реакторе металлический висмут. До пуска промышленного реактора А первые облучения нейтронами висмута осуществлялись в опытном реакторе Ф-1 лаборатории № 2. В основу процесса выделения полония была положена технологическая операция осаждения ^{210}Po из азотнокислых растворов висмута на поверхность порошкового металла (порошок висмута или порошок меди) высокой чистоты, получаемого электрохимическим методом. В растворе содержание полония было 0,01–0,1 Ки/л, а путем многократного переосаждения увеличивали коэффициент обогащения в миллион раз, это обеспечивало высокую чистоту препарата и заданные параметры.

Удельная активность ^{210}Po составляет 4,5 Ки/мг, что соответствует примерно 10^{13} распад/(мин·мг)*. Учитывая, что для указанного источника потребуется 50 Ки, то исходя из норм радиационной безопасности становится очевидным, что при изготовлении первых источников и отработке технологии выделения ^{210}Po сотрудники лабораторий и опытных производств НИИ-9 и КБ-11 работали в экстремальных условиях.

В атомной бомбе после взрыва наружного слоя химической взрывчатки, направленного к центру через слой алюминия, окружающего

* Для ^{235}U те же 4,5 Ки/мг соответствуют лишь $2,15 \cdot 10^4$ распад/мг, что указывает на практически безопасную работу с ураном в открытых помещениях.

отражатель, через слой активного материала (плутония), инициатор создает поток нейтронов, который взаимодействует с зарядом из плутония или ^{235}U , обеспечивая ядерный взрыв. Из изложенного очевидно, что несмотря на полученную схему все составляющие бомбу материалы, узлы и конструкции надо было сначала разработать, а затем изготовить на отечественных предприятиях.

Несколько позднее для безопасной работы с полонием лабораториями З.В. Ершовой и И.В. Петрянова (Научно-исследовательский физико-химический институт им. Л.Я. Карпова), обоснована необходимость трехзональной планировки рабочих помещений лаборатории и опытных производств, занятых работой с полонием, и обязательной очистки от аэрозолей всех воздушных выбросов.

В НИИ-9 под руководством К.П. Корнилова были разработаны методы дезактивации поверхностей помещений и оборудования, загрязненных полонием. Задача получения высокоактивных — единичных препаратов из ^{210}Po была решена в 1948 г.

Подготовка и испытание

Мало кому известно, что в 1946–1949 гг., когда у нас в стране развернулись интенсивные работы по получению делящихся материалов и созданию атомной бомбы, у разработчиков были не только разрозненные данные разведки по схеме атомной бомбы. Еще в 1946–1947 гг. из других источников поступили данные и по подготовке испытаний. Наш официальный представитель физик-ядерщик М.Г. Мещеряков присутствовал в середине 1946 г. на испытании в США двух атомных бомб в Тихом океане на атолле Бикини [51].

Как же попал наш физик на испытания?

Известно, что после взрыва атомных бомб над городами Японии мировая общественность потребовала запрещения ядерного оружия. В работе [82] известный политик и дипломат детально рассматривает причины общественного движения за запрещение ядерного оружия и анализирует отношение в США и в нашей стране к проблемам его создания и совершенствования. Желая продемонстрировать миру свои возможности и силу, руководители США пригласили на испытания в Тихом океане по два наблюдателя от всех стран — членов Совета безопасности ООН для наблюдения за воздействием ядерных взрывов на корабли ВМФ и окружающую среду. Один взрыв был проведен в воздухе над кораблями, второй — под водой. Хотя мировая общественность и была возмущена проведением этих взрывов, американцы к ядерным испытаниям отнеслись относительно спокойно, как к более совершенному виду оружия. В США испытания 1946 г. уменьшили опасения американской публики в такой же мере, в какой бомбы, сброшенные на Японию, их увеличили [83]. Вместе

с М.Г. Мещеряковым в качестве наблюдателя присутствовал профессор С.М. Александров. Среди приглашенных журналистов от СССР был специальный корреспондент газеты «Красный флот» капитан второго ранга А.М. Хохлов. Наши представители могли видеть подготовку к взрывам, размещение поражаемых целей (корабли, самолеты и другие объекты) и наблюдать последствия взрывов. В личной беседе в Дубне 13 июля 1993 г. в присутствии А.М. Петросьянца М.Г. Мещеряков сообщил автору этих строк, что при возвращении с испытаний им был написан подробный (110 с.) отчет, который он передал в Специальный комитет и руководству ПГУ. Естественно, материалы этого отчета и заснятого кинофильма были использованы при оснащении Семипалатинского полигона. М.Г. Мещеряков впоследствии принимал участие и в организации, и в подготовке к испытаниям плутониевой бомбы как в КБ-11, так и на Семипалатинском полигоне [54,68].

Одной из наиболее сложных работ, выполненных КБ-11, было создание надежной системы автоматического управления подрывом заряда на полигоне. Схема должна была удовлетворять нескольким жестким требованиям [68]:

- управление подрывом должно осуществляться по кабельной связи с расстояния 10 км;
- для обеспечения максимальной надежности система управления должна быть двухканальной, с перекрещиванием электрических цепей в каждом узле; каждый сигнал должен иметь ступени предохранения;
- должны иметься устройства обратного контроля, по которым можно было бы убедиться, что посланный сигнал управления дошел до исполнителя;
- должна быть предусмотрена возможность остановки команд, при этом система должна возвращаться в исходное состояние;
- конструкция кабельных разъемов должна исключать возможность их неправильного соединения (требование «на дурака»).

После подготовки всех узлов схемы в Арзамасе-16 были проведены испытания, близкие к натурным. На площадке № 3 КБ-11 с помощью этой системы были проведены три натурных подрыва заряда ВВ. Вместо делящегося материала использовался алюминиевый керн. На испытаниях присутствовали П.М. Зернов, Ю.Б. Харитон, К.И. Щелкин, Н.Л. Духов и В.И. Алферов. Так была завершена подготовка к проведению работ на полигоне в Семипалатинской области.

Согласно требованиям, полигон должен быть расположен в пустынном районе диаметром около 200 км, прилегающем к железнодорожной станции и аэродрому. Таким местом оказалась площадка в 160 км от Семи-

палатинска *, ограниченная рекой Шаган (приток Иртыша), горами Дагилен и Капаястан, отстоящими друг от друга на 100 км [84]. Площадь полигона – 5200 км², точные координаты 49,7–60,125° с.ш. и 77,7–79,1° в.д. На полигоне интенсивно велись работы по подготовке к испытаниям, строились необходимые сооружения и жилой поселок. Поселок располагался в 120 км от г. Семипалатинска на берегу реки Иртыш в 60 км на северо-восток от испытательной площадки. Сама площадка для взрыва первой атомной бомбы находилась в центре полигона. Населенных пунктов на территории полигона не было. Во время строительства полигона, которое продолжалось два года, в 15 км от испытательного поля были построены дома для временного проживания личного состава военных строителей, гостиница для прикомандированных лиц, участвующих в подготовке испытания, столовая, котельная с электростанцией и другие объекты.

Для оценки готовности КБ-11 к проведению испытаний в начале июня 1949 г. в Арзамас-16 прибыла Государственная комиссия в составе Б.Л. Ванникова, И.В. Курчатова, М.Г. Мецерыкова, А.С. Александрова и Н.И. Павлова². Комиссия одобрила работу КБ, назначила Ю.Б. Харитона и К.И. Щелкина ответственными за решение всех организационных вопросов. Распоряжением Ю.Б.Харитона были созданы рабочие группы по таким направлениям:

- подготовка системы автоматики управления подрывом заряда (К.И. Щелкин, В.И. Жучихин, С.Н. Матвеев, А.А. Измайлов);
- сборка зарядов (А.Я. Мальский, М.А. Квасов, А.И. Головкин, А.Я. Титов);
- проверка и монтаж системы инициирования заряда (В.И. Алфёров, В.Н. Буянов, С.Г. Качарянец, В.И. Канарейкин);
- монтаж плутониевого заряда и окончательная сборка заряда (Н.Л. Духов, Н.А. Терлецкий, Д.А. Фишман, В.А. Давиденко);
- транспортировка и подъём заряда на башню полигона (Г.П. Ломинский, Ю.А. Ворошилов, Ф.Ф. Мочалин);
- нейтронные измерения (Г.Н. Флёров, Д.П. Ширшов);
- оперативно-диспетчерская группа (Г.А. Цырков, П.С. Егоров).

Под председательством М.Г. Первухина была организована Государственная комиссия, которая с середины июля 1949 г. начала приемку объектов полигона. На полигоне были построены все необходимые для испытаний сооружения:

- здание командного пункта с укрытиями от ударной волны, пультами управления подрывом заряда, измерительным аппа-

* Впоследствии на ней было проведено > 300 взрывов [84]. С 1961 по 1989 г. только подземных взрывов было проведено 348.

² Н.И. Павлов был ответственным за доставку изделий плутониевого заряда на полигоне и лично, под расписку получал его на предприятии. В последующие годы работал заместителем начальника ПГУ, руководителем главка и директором Всесоюзного научно-исследовательского института авиационной автоматики.



**БОРИС
ЛЬВОВИЧ
ВАННИКОВ**
(1897–1962) —
заместитель
председателя
Специального
комитета,
начальник ПГУ
с 1945 по 1949 г.

ратурным комплексом, аппаратурой команд управления и связи со всеми площадками полигона;

- здание для хранения нейтронного запала (источника) и проведения наладки аппаратуры для нейтронных измерений, а также хранения всей конструкторской и эксплуатационной документации;
- здания лабораторных корпусов и цехов для хранения деталей заряда, его сборки, временного хранения собранного заряда и ремонтно-механический цех;
- различные объекты, построенные на разных расстояниях от предполагаемого эпицентра взрыва: отрезки шоссе и железных дорог с мостами, железнодорожным транспортом и различными грузовыми автомобилями;
- отрезки тоннелей метро глубиной 15–30 м на расстоянии 200–300 м от эпицентра.

Кроме того, для изучения влияния отраженной ударной волны и ядерного взрыва на расстоянии 800 м от эпицентра были построены 2 трехэтажных здания с расстоянием между ними 20 м (ширина городской улицы). На различных расстояниях размещалась военная техника, включая самолеты, аэростаты, танки и бронемашины. Были установлены скоростная и обычная киноаппаратура, а также многочисленные приборы и измерительная техника для определения параметров взрыва, развития газового облака, светового излучения, ударной волны, нейтронного и γ -излучения. В качестве подопытных были привезены большое количество разных видов живности и даже 2 верблюда.

Государственная комиссия под председательством М.Г. Первухина закончила приемку полигона 10 августа 1949 г. Кинооператоры

сняли боевую технику, все здания и сооружения, блиндажи и биологические объекты.

Для изучения параметров взрыва плутониевой бомбы и его последствий в институтах и КБ были сформированы бригады участников испытания атомной бомбы. Кроме сотрудников КБ-11 на полигоне присутствовали представители ЛИПАНа, комбината № 817, РИАНа, ГЕОХИ, ИХФ, Государственного оптического института, организаций Министерства обороны, Минздрава и других ведомств. Участник испытаний от комбината № 817 Я.П. Докучаев [54] называет сотрудников, которые представляли РИАН: Б.А. Никитин, И.Е. Старик, Б.С. Желепов, Н.А. Власов, Г.Н. Горшков, П.И. Толмачев. Другие организации, кроме работников Министерства обороны, ПГУ и Специального комитета, представляли: А.И. Буриалян, А.П. Виноградов, М.Г. Мещеряков, А.П. Александров, режиссеры и кинооператоры. Однако, как отмечал режиссер А.П. Челаков [85], участник съёмки фильма о взрыве первой атомной бомбы, число киноработников было строго ограничено: «Ни одного нашего оператора на Берегу* тогда не было. Они подключились позже. Все съёмки были проведены техническими средствами полигона без участия людей. Погода же была просто пасмурная, и никаких страстей не было. Мне же поручили смонтировать фильм о первом взрыве плутониевой бомбы, что я и сделал ...»

Работники госбезопасности во главе с генерал-лейтенантом П.Я. Мешиком обеспечивали режим секретности. 28 августа 1949 г. вся подготовка к проведению испытаний была закончена. Хронология работ на полигоне 27–28 августа подробно описана [68]. Вот ее отдельные этапы, которые выполнялись перед самым взрывом 28 августа:

* Так у работников кино тогда назывался полигон (на берегу Иртыша).



**МИХАИЛ
ГЕОРГИЕВИЧ
ПЕРВУХИН**
(1904–1978) —
заместитель
председателя
Совнаркома,
член
Специального
комитета,
председатель
Государственной
комиссии
по приемке
полигона

- с 10⁰⁰ до 16⁰⁰ подготовка заряда к снаряжению, доставка плутониевого заряда и нейтронного запала;
- с 16⁰⁰ до 21⁰⁰ подготовка центрального узла, содержащего плутоний;
- с 21⁰⁰ до 3⁰⁰ 29 августа установка центрального узла в заряд, измерение фона нейтронов, установка последнего фокусирующего элемента и закрытие крышки корпуса заряда.

Весь измерительный комплекс вводится в боевое положение. Заряжаются пленкой фото-, кино- и осциллографическая аппаратура. В 4⁰⁰ 29 августа на командном пункте (НП-1) печатается пульт управления, обесточиваются все линии кабельных связей. В 4³⁰ начат подъем заряда на верхнюю площадку испытательной башни (высота 30 м). После подъема клеть жестко скрепляется с площадкой башни. В 5⁰⁰ начинается снаряжение заряда капсулами-детонаторами. Руководил этими работами К.И. Щелкин. Работы проводили Г.П. Ломинский и С.Н. Матвеев. Контролировали их лично заместители начальника ПГУ А.П. Завенягин и А.С. Александров. На командном пункте НП-1 в 7 км от эпицентра находились Л.П. Берия, М.Г. Первухин, И.В. Курчатов, Ю.Б. Харитон, Г.Н. Флёров и другие работники КБ-11 и охраны. На НП-2, расположенном в 10 км южнее эпицентра, находились только 8 чел. [54]:

А.П. Виноградов — член-корреспондент АН СССР, директор ГЕОХИ, помощник И.В. Курчатова по аналитической химии и заместитель руководителя пусковой бригады радиохимического завода в Челябинске-40;

Н.Л. Духов — генерал-майор, руководитель сектора КБ-11, ответственный за монтаж плутониевого заряда и его окончательную сборку;

Б.А. Никитин — член-корреспондент АН СССР, заместитель директора РИАНа, руководитель пусковой бригады первого радиохимического завода в Челябинске-40, выделившего плутоний;

М.Г. Мешеряков — участник испытания в 1946 г. атомных бомб в США, заместитель директора ЛИПАНа, руководитель проектирования и сооружения первого в СССР синхротрона;

Б.Я. Зельдович — член-корреспондент АН СССР, главный теоретик создания бомбы;

Я.П. Докучаев — руководитель группы радиометрических методов контроля плутония и продуктов деления в технологических процессах радиохимического завода в Челябинске-40;

полковник КГБ, ответственный за режим;

адъютант генерала Н.Л. Духова.

Время взрыва первоначально было намечено на 8⁰⁰, а затем перенесено. В публикациях В.И. Жучихина и Я.П. Докучаева не совпадают данные о новом времени взрыва. В первой из них это время было перенесено с 8⁰⁰ на 7⁰⁰ (и это фигурирует во многих изданиях). Я.П. Докучаев, присутствовавший на НП-2, утверждает, что испытание было перенесено даже на 6³⁰. После взрыва, как отмечает Я.П. Докучаев, на НП-2 приехал только И.В. Курчатов для личной беседы с М.Г. Мещеряковым об эффективности ядерного взрыва. В работе [68] отмечается, что на эту встречу на НП-2 направлялся кортеж машин во главе с Л.П. Берией и И.В. Курчатовым. Хотя разница во времени взрыва и не столь существенна, однако впечатления об эффективности взрыва в ранние утренние часы могут быть у участников наблюдения разными. Это время связано с восходом солнца на полигоне — 5³⁰ 29 августа 1949 г. [54]. Другие участники испытаний тоже называют разное время взрыва. Приведем высказывание одного из руководителей атомной программы М.Г. Первухина, который находился на командном пункте: «В ночь с 28 на 29 августа члены комиссии лично проверили готовность испытания ... В нашем присутствии бомба была собрана, поднята на башню и укреплена. После этого все отправились на командный пункт... На рассвете, примерно в 4–5 утра, с пункта, где мы все находились, автоматическим устройством был включен сигнал замыкания и произошел взрыв первой советской атомной бомбы... Мы все выбежали наружу и увидели яркое пламенное облако, вслед за которым поднимался черный столб земной пыли, превращаясь в гигантский гриб» [11]. Реакция руководителей испытаний, включая Л.П. Берия, сразу после взрыва приведена в различных публикациях работников КБ-11. После взаимных поздравлений и радостных объятий Л.П. Берия обратился к И.В. Курчатову с предложением дать только что взорванному ядерному заряду название. И.В. Курчатов ответил, что оно уже есть и это название придумал К.И. Щелкин. Заряд был назван РДС-1, что означало: «Россия делает сама». В последующем другим ядерным зарядам, включая и водородное оружие, в течение нескольких лет давали названия РДС-2, РДС-3 и т.д. [78].

Для оценки интенсивности радиации примерно через 10 мин после взрыва два специально «защищенных» танка КВ, оснащенных дозиметрической аппаратурой, направились в эпицентр к основанию ножки радиоактивного гриба. Как пишет заместитель министра здравоохранения А.И. Бурназян, находившийся в одном из танков, его танк² на максимальной скорости через десяток

* В других публикациях, например [44], указано, что, название РДС-1 и т.д. предложено секретарем Специального комитета В.А. Махнёвым и расшифровывается иначе — «реактивный двигатель Сталина». В США их называли также в честь И.В. Сталина — «Джо-1» и т.д.

² Второй танк шел по другому маршруту в местах разрушений бронетехники, мостов и т.д.

минут после взрыва был в эпицентре. Собрав нужную информацию и отобрав пробы оплавленной земли, экипаж возвратился для доклада результатов руководителю Государственной комиссии и И.В. Курчатову, которые находились вместе с сопровождающими на дороге недалеко от эпицентра. Руководство, пишет А.И. Бурназян, внимательно и с благодарностью выслушало разведчиков службы радиационной безопасности. Радиоактивное облако наземного взрыва пронеслось в безлюдную степь, и территория, которую посетил председатель Государственной комиссии, не была сильно загрязнена продуктами деления [11]. В эпицентре же 30-м башня, на которой была установлена бомба, вместе с бетонным основанием испарилась, а на ее месте зияла огромная воронка. Танки шли по затвердевшему расплавленному грунту, жутко хрустящему под гусеницами. Кругом все было разрушено.

Присутствовавшие на полигоне по-разному описывают взрыв и его последствия.

Целесообразно привести данные о некоторых параметрах характеристик момента взрыва и в первые секунды после него [69]. При взрыве, эквивалентном взрыву 20 тыс.т тротила, через 10^{-6} с радиус огненной сферы, состоящей из раскаленных паров и газов, составляет около 15 м, а температура — 300000°C. Уже примерно через 0,015 с радиус увеличивается до 100 м, а температура падает до 5000–7000°C. Через 1 с огненный шар достигает максимальных размеров (радиус 150 м)*. Вследствие сильного разряжения огненный шар с большой скоростью поднимается вверх, увлекая за собой пыль с поверхности земли. Остывая, шар превращается в клубящееся облако, имеющее характерную для ядерного взрыва грибовидную форму. Такой огненный шар и наблюдали присутствовавшие на полигоне 29 августа 1949 г.

Эффективность взрыва и последствия

Главными параметрами заряда являются коэффициент использования делящегося материала и мощность. Ранее в печати эти параметры называли такими же, как у американской бомбы. По-видимому, повлияло то, что наша бомба была сделана по схеме США: мощность — 20 кт тротила, кпд — 5%. В ряде последних публикаций приводятся разные данные о мощности взрыва плутониевой бомбы 29 августа 1949 г. — от 10 до 20 кт. Я.П. Докучаев, проводивший анализ использования плутония в первой бомбе радиохимическим методом, указывает, что мощность взрыва была даже меньшей² [54].

* В момент взрыва в зоне ядерной реакции температура достигает десятков миллионов градусов Цельсия, что приводит к повышению давления до миллиардов атмосфер [69].

² При сгорании 1 кг плутония или урана выделяется энергия, эквивалентная энергии взрыва 20 тыс.т тротила. Если даже кпд будет 10%, то количество плутония в заряде должно быть примерно 10 кг.

Работу по определению количества выделившейся энергии и кпд изделия на основании анализа проб, отобранных на полигоне, возглавляли Б.А. Никитин, А.П. Виноградов, И.Е. Старик, П.И. Толмачев и др. Радиометрические измерения β - и γ -активности выполняли сотрудники РИАНа Б.С. Джелепов, Н.А. Власов, Г.Н. Горшков и др. α - Активность, характеризующую количество непрореагировавшего плутония, измерял Я.П. Докучаев.

Представительные пробы отбирали из эпицентра и на различных расстояниях по радиусу. Количество разделившихся ядер плутония измеряли по излучению β - и γ -активности основных осколочных элементов ^{95}Zr , ^{95}Nb , ^{137}Cs , ^{144}Ce и др. Анализ всех этих измерений позволял судить о количестве выделившейся энергии и кпд. В отборе проб из эпицентра через сутки после взрыва 30 августа участвовали Н.А. Власов, Г.Н. Горшков и Я.П. Докучаев. У старшего группы (Н.А. Власов) был стрелочный дозиметр. Их снаряжение состояло из комбинезона, противогаза, резиновых перчаток, металлического совка, брезентового мешочка для отбора проб, солдатских ботинок. На «козлик» быстро достигли эпицентра и сразу же заполнили мешочки пробами (по крупнее и помельче). Работу по отбору проб выполнили за 5–7 мин. Зона расплава и спекания песка территории вокруг эпицентра была ограничена радиусом около 250 м. Вблизи эпицентра застывший расплав под массой человека (90 кг) не проваливался. В эпицентре подобия котлована не было обнаружено [54]. Из зоны эпицентра, как пишет Я.П. Докучаев, пробоотборщики выходили быстрым шагом, но не бежали. В общей сложности на это «путешествие» ушло около 15 мин. Затем пробы отвезли для исследований. Кроме состояния легкого опьянения и головокружения, которые они ощутили после возвращения в поселок, других осложнений не было. На другой день отбор проб проводили другие сотрудники под руководством И.Е. Старика. Большое количество проб было отправлено для подробного исследования в различные институты страны.

Предварительные итоги, подведенные на полигоне, показали, что испытания прошли успешно.

Взрыв советской атомной бомбы был неожиданным для лидеров капиталистического мира, которые ожидали конечного результата намного позже. С монополией США было покончено.

Так как США продолжали производить делящиеся материалы и интенсивно проводили испытания более совершенного ядерного оружия, наша страна вынуждена была увеличивать производство плутония и отрабатывать технологию получения высокообогащенного ^{235}U . Для этого на комбинате № 817 совершенствовалась работа первого промышленного реактора и строились новые ядерные реакторы. 15 июля 1950 г. был пущен более совершенный уран-графитовый реактор АВ-1.

В 1951 г. под научным руководством И.В. Курчатова и В.С. Фурсова введены реакторы АВ-2 (6 апреля) и АИ (22 декабря), а под руководством А.И. Алиханова и В.В. Владимирского – реактор ОК-180 (17 ноября). В 1952 г. вводится реактор АВ-3 (24 мая). На другом уральском комбинате (директор А.И. Чурин) в поселке Верх-Нейвинском (первый диффузионный завод Д-1) под научным руководством И.К. Кикоина, И.Н. Вознесенского и С.Л. Соболева в 1950 г. было освоено получение в небольших количествах высокообогащенного ^{235}U . В марте 1949 г. для расширения производства делящихся материалов правительство принимает решение о строительстве Сибирского химического комбината (№ 816, г. Томск-7). Были построены уран-графитовые реакторы для наработки плутония и в Красноярске-26.

Развитие производства плутония и ^{235}U требовало резкого увеличения добычи и переработки урановых руд, изготовления блоков из урана для ядерных реакторов, развития радиохимии, получения в больших количествах гексафторида урана (UF_6) для диффузионных заводов, развития машино- и приборостроения. Для более эффективного развития атомной промышленности и лучшей координации работ в конце 1949 г. в ПГУ была проведена реорганизация. Постановлением от 27 декабря 1949 г. из состава ПГУ были выделены Горно-металлургическое управление и часть других подразделений, а на их базе организовано ВГУ при Совете Министров СССР. Руководителем ВГУ был назначен заместитель начальника ПГУ П.Я. Антропов. Его заместителями стали Н.Б. Карпов и Б.И. Нифонтов. В состав ВГУ кроме основного комбината по добыче урана № 6 (Таджикистан) было передано еще 7 предприятий, включая строительную организацию и завод № 48 («Молния»).

Не только военные проблемы стояли перед атомной промышленностью. Уже в середине 1950 г. (постановление от 29 июля) на ПГУ было возложено научно-техническое и организационное руководство работами по использованию атомной энергии для развития научных исследований, а также в мирных целях для народного хозяйства страны. При наличии обогащенного урана могли создаваться различные исследовательские реакторы. Появилась возможность в специальных реакторах набирать в значительных количествах различные изотопы для народного хозяйства и в военных целях. Наличие обогащенного урана приблизило использование атомной энергии для получения тепла и электричества. В СССР начиналась эра развития ядерной энергетики.



• Сначала конечный продукт имел обогащение ^{235}U только 75%.

Получение обогащенного ^{235}U и освоение его производства в промышленных масштабах

В отличие от открытых только в 1940 г. плутония и ^{239}Np уран был известен с 1789 г. Этот элемент был открыт немецким химиком М.Г. Клапротом сначала в виде оксида (UO_2), который в течение примерно 50 лет принимали за металл. Металлический же уран впервые был получен французским исследователем Э.М. Пелиго в 1841 г. в результате восстановления тетрахлорида урана металлическим калием [86]. Э.М. Пелиго по праву считается родоначальником современной химии урана.

Природный уран долгое время считался состоящим из одного изотопа с массой 238. Ранее считалось, что в уране содержится около 0,72% ^{235}U , 99,28% ^{238}U и следы ^{234}U . Перспективы использования ^{235}U для получения цепной реакции и внутри-ядерной энергии очень скоро сделали уран самым изучаемым элементом. Был уточнен изотопный состав природного урана (табл.18) и определены его основные ядерные свойства. Как видно из табл. 18, периоды полураспада ^{235}U и ^{238}U значительно отличаются. Поэтому приблизительно 2 млрд. лет тому назад количество ^{235}U в природной смеси изотопов составляло >3%, а не 0,72%, как в настоящее время. Оказалось, что при обогащении ^{235}U , равном обогащению урана в реакторах типа ВВЭР (около 3%), в отдельных богатых месторождениях урановых руд при соответствующих условиях (влажа, состав пород) могли осуществляться в земной коре цепные ядерные реакции и даже «работали» природные ядерные реакторы на тепловых нейтронах. Такой реактор работал 1,8 млрд. лет назад в Африке на территории современного Габона, и стало известно об этом французским ученым в 1972 г., когда в руде из Габона было определено более низкое содержание ^{235}U , чем в других месторождениях [87].

Главный вид ядерного горючего ^{235}U достоин того, чтобы напомнить читателю, что в сентябре 1972 г. на основании тща-

* Из ^{239}Np при его β -распаде образуется ^{239}Pu .

тельных геологических и минералогических исследований учеными Французской академии наук был сделан доклад на Генеральной конференции МАГАТЭ о том, что этот природный реактор проработал ≥ 100 тыс. лет и выработал около 10 ГВт·лет энергии. Были сделаны оценки выгорания урана и накопления плутония. В одной из шахт месторождения Окло оказалось около 500 т урана, который в 1972 г. в среднем содержал 0,62% ^{235}U , а не 0,72%. Был даже обнаружен образец урана, в котором концентрация ^{235}U составляла 0,296%. Нарботанный ^{239}Pu , имея период полураспада 24,4 тыс. лет, за это время распался и в пробах не обнаружен.

Таблица 18

Основные свойства встречающихся в природе изотопов урана [86,88]

Показатель	^{234}U	^{235}U	^{238}U
Распространенность, %:			
«лучшие» данные	$0,005 \pm 0,001$	$0,720 \pm 0,001$	$99,275 \pm 0,002$
по разным данным	$0,0050 - 0,0059$	$0,7198 - 0,7202$	$99,2739 - 99,2752$
Период α -распада, лет	$2,45 \cdot 10^5$	$7,037 \cdot 10^8$	$4,468 \cdot 10^9$
Количество распадов, распад / (кг·с)	$2,26 \cdot 10^{11}$	$7,94 \cdot 10^7$	$1,24 \cdot 10^7$
Период спонтанного деления, лет	$2 \cdot 10^{16}$	$3,5 \cdot 10^{17}$	$8,19 \cdot 10^{15}$
Количество спонтанных делений ядер, деление / (кг·с)	3,54	0,313	6,96
Порог деления ядер нейтронами, МэВ	0,6	Тепловые нейтроны	1,5
Сечение захвата тепловых нейтронов, б 2	97	694	2,71

* Энергия тепловых нейтронов 0,025 эВ.

$^216 = 10^{-24} \text{ см}^2$.

Не останавливаясь подробнее на «феномене Окло», следует отметить, что 23–27 июня 1975 г. в Габоне проводилась международная конференция, где от нашей страны участвовал руководитель аналитической службы, заместитель директора ВНИИХТа В.А. Пчелкин. Он доложил о результатах изучения 10 проб урановой руды месторождения Окло, полученных в начале 1975 г. В исследованных образцах были обнаружены продукты деления и распада урана, причем их концентрации отличались от фоновых концентраций, имеющих в природе долгоживущих изотопов тория, свинца, плутония и др. Например, количество долгоживущего изотопа ^{244}Pu ($T_{1/2} = 8,18 \cdot 10^7$ лет) в миллионы раз выше фоновых значений, имеющих в обычных урановых месторождениях; содержание ^{232}Th в пробах урана было сравнимо с концентрацией ^{235}U . Примерно за 100 тыс. лет работы ^{235}U в «природном реакторе» не только делился, но и по реакции (n, γ) превращался в ^{236}U , который

затем путем последовательных реакций распада превращался в стабильный изотоп свинца: $^{236}\text{U} \xrightarrow{\alpha} ^{232}\text{Th} \rightarrow \dots ^{208}\text{Pb}$.

Период полураспада ^{232}Th достаточно высок — $1,41 \cdot 10^{10}$ лет, а спонтанного деления $> 10^{21}$ лет, и он поэтому практически полностью сохранился. ^{236}U имеет период полураспада $2,342 \cdot 10^7$ млн. лет, и за 2 млрд. лет он полностью превратился в ^{232}Th . Это значит, что месторождения урана, где содержание $^{235}\text{U} < 0,72\%$, могут быть найдены и в других регионах, где работали природные реакторы.

О вкладе советских и немецких ученых в решение урановой проблемы в СССР

Работы по разделению изотопов урана в газовой фазе были начаты в лаборатории № 2 сразу же после ее организации в 1943 г. В 1944 г. в лаборатории № 2 Л.А. Арцимович был назначен ответственным за изучение электромагнитного метода разделения изотопов урана.

К середине 1944 г. к разработке методов разделения изотопов была привлечена Лаборатория электрических явлений, руководимая И.К. Кииконым в Уральском филиале АН. В эту лабораторию был откомандирован Ф.Ф. Ланге, который раньше работал в ХФТИ, а затем в г. Уфе над созданием газовой центрифуги. Однако до конца войны работы велись малыми силами. Тем временем в Государственном союзном НИИ-42 Наркомхимпрома (в лаборатории Б.В. Алексеева) были получены первые 10 г UF_6 , который является наиболее химически устойчивым газообразным соединением урана. После окончания войны и организации Специального комитета и ПГУ отношение к урановой проблеме диаметрально изменилось. Для участия в исследованиях были привлечены немецкие специалисты, оказавшиеся в ходе войны на территориях, занятых Советской Армией [89]. Хорошо известно, что в предвоенные и военные годы наибольших успехов в изучении высвобождения внутриядерной энергии добились ученые Германии и США. Так называемую «урановую машину» немцы намеревались использовать в качестве двигателя для ракет и подводных лодок, а также в атомной бомбе. Советские специалисты сумели получить данные, которые позволили составить схему организации работ, проводившихся в Германии по этой проблеме, а также установить объемы этих работ, полученные по ним конечные результаты, примерное количество урана и тяжелой воды, которым располагала Германия до капитуляции, и ряд других сведений. О полученных данных было доложено руководителям проводимых у нас работ по проблеме № 1 Б.Л. Ванникову и И.В. Курчатову [89]. Поэтому неслучайно, что еще в конце 1945 г. постановлением Совнаркома от 19 декабря 1945 г. было поручено привлечь немецких специалистов для работы в СССР. В системе НКВД созданное еще в 1944 г. специальное

подразделение во главе с А.П. Завенягиным (9 Управление)*, было призвано обеспечивать работу приглашенных немецких ученых и специалистов. Также поступали и наши союзники, которые в результате разгрома Германии собрали в своей зоне оккупации таких ученых, как Гайзенберг, Ган, Гартек, Герлах, Штрасман, Боте, Дибнер и др. Руководитель Манхэттенского проекта генерал Л. Гровс в своих воспоминаниях отмечал [89]: «Все основные материалы немцев в 1945 г. были изъяты, а из важных ученых лишь немногие были в наших руках. На этом этапе мы, конечно, беспокоились в основном о том, чтобы информация и ученые не попали к русским».

Как союзники, так и руководство нашей страны при демонтаже в Германии ряда производств, научных учреждений и других объектов, в первую очередь связанных с военной промышленностью, в ряде случаев предлагали работать на победителей крупным немецким специалистам по контракту, с четким определением прав и взаимных обязательств. Наша сторона сделала такие предложения некоторым крупным ученым. Предложение приняли профессор барон М. Арденне, руководивший в Берлине собственной лабораторией электронной и ионной физики, нобелевский лауреат Г. Герц, возглавлявший лабораторию фирмы Siemens в Берлине, а также профессора Р. Доппель, М. Фольмер², Г. Позе, П. Тиссен; доктора В. Штуце, Н. Риль и другие специалисты. Всего из Германии в СССР прибыло примерно 200 специалистов, среди них 33 доктора наук, 77 инженеров и около 80 ассистентов и лаборантов. К концу 1948 г. в СССР находилось приблизительно 300 немецких специалистов и квалифицированных рабочих. Часть прибывших были связаны с разработкой технологии получения высокообогащенного урана.

Работы по разделению газовых смесей изотопов в нашей стране тоже проводились. Под руководством Комиссии АН СССР по изотопам (руководитель академик В.И. Вернадский) в апреле 1940 г. была проведена Всесоюзная конференция с обсуждением планов работ по получению тяжелой воды методом электролиза и разделения изотопов урана масс-спектрометрическим методом из паров металла и методом термодиффузии UF₆.

Ранее отмечалось, что в ХФТИ ученый немец-эмигрант Ф.Ф. Ланге вел лабораторные опыты с применением горизонтальной высокооборотной центрифуги в целях разделения изотопов урана. Как отмечает Н.М. Синёв [28], установка Ф.Ф. Ланге в 1944 г. была передана сначала Свердловской лаборатории электрических явлений

* С 1946 по 1949 г. заместителями начальника 9 ГУ работали А.Д. Зверев и А.И. Лейпунский.

² Работал в СССР с 1945 по 1955 г., впоследствии — президент АН ГДР и иностранный член АН СССР.

(И.К. Кикоину), а в мае 1945 г. эта лаборатория и сам Ф.Ф. Ланге перебазировались в Москву. Некоторые работы проводились и в других институтах еще в довоенный период. На Техническом совете Специального комитета, ответственного за реализацию программы № 1, уже в сентябре 1945 г. были заслушаны доклады [28]: 6 сентября И.К. Кикоина (лаборатория № 2) и П.Л. Капицы (ИФП) «О состоянии исследований по получению обогащенного урана газодиффузионным методом»; 10 сентября Л.А. Арцимовича (лаборатория № 2) и А.Ф. Иоффе (ЛФТИ) «Об обогащении урана электромагнитным методом».

В декабре 1945 г. были конкретизированы направления работ и определены руководители: газодиффузионный метод разрабатывался под общим руководством И.К. Кикоина; электромагнитный метод — под руководством Л.А. Арцимовича; методы термодиффузии — А.П. Александрова и И.К. Кикоина. Научное руководство разработками диффузионного метода обогащения урана правительством было конкретизировано и возложено на трех ученых во главе с И.К. Кикоиным: он отвечал за физику процессов, профессор И.Н. Вознесенский* — за инженерные решения, академик С.Л. Соболев² — за расчетно-теоретические работы.

Были развернуты работы немецких ученых. Под руководством М. Арденне в помещении санатория «Синоп» (г. Сухуми) создается институт А, на который возлагается разработка следующих методов [5,84,89]:

- электромагнитного метода разделения изотопов урана (руководитель М. Арденне);
- методов изготовления диффузионных перегородок (руководитель П. Тиссен);
- молекулярных методов разделения изотопов урана (руководитель М. Штеенбек).

В помещении санатория «Агудзеры» (вблизи г. Сухуми) размещается институт Г под руководством лауреата Нобелевской премии Г. Герца. На этот институт возлагаются такие работы:

- разделение изотопов методом диффузии в потоке инертного газа (руководитель Г. Герц);
- разработка конденсационного насоса (руководитель Мюленпфорд);
- создание теории устойчивости и регулирования диффузионного каскада (руководитель Г. Барвих);

* Бывший главный конструктор КБ гидромашин Ленинградского металлического завода, заведующий кафедрой Политехнического института; с начала 1946 г. возглавил Ленинградское отделение лаборатории № 2.

² Крупнейший советский математик, заместитель руководителя лаборатории № 2.

- конструирование масс-спектрометра для определения изотопного состава урана (руководитель В. Шютце);
- разработка бескаркасных (керамических) диффузионных перегородок фильтров (руководитель Р. Райхман).

Руководителям этих институтов М. Арденне и Г. Герцу^{*} разрешалось на добровольных началах приглашать для работы в СССР известных им ученых и квалифицированных специалистов. Немецкие ученые и специалисты работали в комфортабельных условиях. Им всем были установлены твердые должностные оклады, разрешена переписка и предоставлена возможность отправлять посылки. Вместе с немецкими учеными в «Агудзерах» и «Синопе»^{**} работали советские физики из Тбилиси Ш.С. Бурдиашвили, И.В. Гвердцители, И.Ф. Кварцахо и др.

Немецкие специалисты работали и на других объектах, связанных с использованием урана. Под руководством профессора Р. Позе в 1946–1947 гг. в Калужской области (станция Обнинское) была создана лаборатория В. С 1946 по 1953 г. он был одним из научных руководителей по созданию ядерного реактора на слабообогатенном уране. Лаборатория В была организована на базе помещений детской трудовой колонии. В ней работали 23 немецких специалиста под научным руководством Р. Позе и члена Украинской АН А.И. Лейпунского^{***}.

Лаборатория Б для немецких и части реабилитированных отечественных специалистов была организована в санатории «Сунгуль» около г. Касли в Челябинской области, где работали Н.В. Тимофеев-Рессовский (возглавлял радиобиологический отдел) и немецкие ученые К. Циммер, Г. Борн, А. Кач и др. Директором лаборатории Б был А.К. Уралец, его заместителем по общим вопросам — И.П. Увин (впоследствии начальник Финансового управления Минсредмаша), а научным руководителем химического отдела — профессор С.А. Вознесенский. Кроме немцев в лаборатории работали и вольнонаемные советские специалисты: Ю.П. Москалев, Л.А. Булдаков^{***}, П.В. Горбатюк, А.А. Горюнов, несколько позднее — Г.А. Серeda, П.Ф. Долгих, Л.И. Басков и др. После

^{*} Они работали в СССР с 1945 по 1955 г. и были награждены Государственными премиями, причем М. Арденне — дважды (в 1947 и 1953 гг.) [5].

^{**} Для решения всех хозяйственных вопросов институты А и Г входили в состав объектов «Синоп» и «Агудзеры», которыми руководили С.А. Тополин и С.М. Жданов.

^{***} А.И. Лейпунский работал в ЛФТИ, стажировался в Кавендишской лаборатории у Э. Резерфорда; с 1934 по 1937 г. и с 1941 по 1944 г. — директор ХФТИ, с 1952 по 1972 г. — научный руководитель ФЭИ в г. Обнинске.

^{***} Академик АМН России, заместитель директора Института биофизики Минздрава России.

перевода А.К. Уральца в НИИ-9 директором лаборатории Б был назначен Г.А. Середа* – впоследствии начальник ЦЗЛ на комбинате № 817 в Челябинске-40. Под руководством С.А. Вознесенского впервые в стране была разработана технология получения чистых осколочных элементов, таких, как ^{90}Sr , ^{137}Cs , ^{95}Zr , и технология очистки от них.

Кроме институтов А и Г, лабораторий Б и В отдельные группы немецких специалистов работали на заводе № 12 (Н. Риль и П. Тиссен), в НИИ-9 (М. Фольмер и Р. Доппель), ЛИПАНе (И. Шетельмейстер). Как уже отмечалось [84, 89], ряд немецких ученых были награждены правительственными наградами. Так, доктор Г. Виртц за разработку технологии получения металлического урана из UF_6 дважды удостоивался Сталинской премии. Доктор Штуце за разработку перегородок для диффузионных машин тоже был удостоен Сталинской премии. Доктору Н. Рилью за работы, связанные с технологией производства чистого металлического урана, кроме Сталинской премии было присвоено звание Героя Социалистического Труда.

В 1953 г. немецкие специалисты были в основном освобождены от многих работ и вскоре выехали в Германию. В целом работы немецких ученых были составной частью общих задач, решаемых у нас в стране в рамках атомной программы, однако они не были связаны с работами предприятий и КБ, расположенных в Арзамасе-16 (г. Кремлёв), Челябинской области (г. Снежинск) и Свердловске-45 (г. Лесной) [89]. Засекреченность проводимых в СССР работ по разделению изотопов урана привела в ряде случаев к односторонней оценке вклада немецких ученых в решение проблемы получения высокообогащенного ^{235}U . За рубежом воспоминания об этих работах были опубликованы еще в 70-х гг., когда наши специалисты не имели возможности публиковаться в открытой печати.

Как отмечается зарубежными авторами [84], профессор П. Тиссен создал модель диффузионной установки, которая в 1949 г. была смонтирована на заводе в поселке Верх-Нейвинском. Работавший в Синопе (институт А) немецкий ученый на основании своих исследований получил разрешение изготовить диффузионную установку с обогащением ^{235}U 50–90%. Позднее он работал над созданием газовой центрифуги. В работе [84] роль немецких ученых явно преувеличена. О вкладе отечественных и немецких специалистов в решение проблемы получения высокообогащенного ^{235}U наиболее детально изложено в книге активного создателя этой технологии профессора Н.М. Синёва [28], а также в обзоре профессора Н.П. Галкина² [90].

* С 1946 г. работал на заводе № 12 в г. Электростали, а затем главным инженером завода в г. Глазове.

² Работал на заводе № 12 в г. Электростали, начальником ЦЗЛ в г. Глазове, начальником ИТУ в Минсредмаше, начальником отдела во ВНИИХТе.

Создание комбината № 813 для получения ^{235}U

Постановление Совнаркома СССР о сооружении первого в стране диффузионного завода было принято 1 декабря 1945 г., фактически сразу же после образования Специального комитета. Существовала ли научная база для принятия такого решения? К этому времени было известно, что скорости теплового движения молекул разных химических элементов могут существенно отличаться. Это утверждение исходило из фундаментального закона Грэма (1932 г.), по которому при заданной температуре средние скорости молекул газов зависят от их масс. Исходя из закона Грэма можно было предположить, что скорости диффузии изотопных молекул через пористую перегородку будут различными и обратно пропорциональными их массам. Еще в 1896 г. английский физик Дж. Рэлей показал, что если смесь двух газов различных атомных весов пропустить через пористую перегородку, то ее состав до и после перегородки будет различаться. Кроме газодиффузионного процесса были известны еще ряд методов разделения газовых смесей. Так, комиссия АН СССР, возглавляемая И.В. Вернадским, в 1940 г. на Всесоюзной конференции в качестве одной из проблем рассматривала планы работ по разделению изотопов урана методом термодиффузии UF_6 и масс-спектрометрическим методом из паров металла.

Одним из наиболее исследованных процессов был газодиффузионный. Крупнейшему ученому Г. Герцу еще в 1932 г. удалось в лабораторных условиях впервые в мире разделить смесь легких благородных газов пропуская ее через пористые перегородки. Им был смонтирован небольшой каскад из соединенных последовательно нескольких разделительных элементов, оборудованных примитивными пористыми мембранами. Эта принципиальная схема могла быть использована и для разделения изотопов урана. Решающим же было то, что из данных разведки наше правительство знало о работах по получению газодиффузионным методом высокообогащенного ^{235}U , из которого, а также из плутония были изготовлены и взорваны в августе 1945 г. атомные бомбы. Поэтому, не дожидаясь окончания работ наших и привлеченных для совместных исследований немецких ученых, правительство приняло решение строить в поселке Верх-Нейвинском на Среднем Урале первый завод Д-1 — будущий комбинат № 813.

Небольшое различие в скоростях изотопов газообразных соединений ^{235}U и ^{238}U приводит к тому, что более легкий изотоп быстрее проникает через пористую перегородку и смесь за перегородкой обогащается им. Газообразное соединение урана должно быть достаточно летучим и химически устойчивым, а химический элемент, с которым соединен уран, должен иметь только один изотоп. Такими

свойствами обладает только UF_6 . Поры диффузионных перегородок должны быть столь малыми, чтобы движущиеся в них молекулы проходили свободно, не сталкиваясь между собой, то есть диаметр капилляра должен быть меньше длины свободного пробега молекул. Попадая в такие мельчайшие поры, легкие и тяжелые молекулы рабочего газа почти не сталкиваются друг с другом, а взаимодействуют только со стенками пор. Так как легкие молекулы, содержащие ^{235}U , более подвижны, то при одинаковой температуре через поры перегородок их перейдет несколько больше, чем молекул, содержащих более тяжелый изотоп ^{238}U . В результате за перегородкой будет накапливаться все больше легких изотопов и газовая смесь урана там будет несколько обогащена ^{235}U по сравнению с газовой смесью на входе в перегородку (рис. 12).

Массовые числа молекул UF_6 (тяжелой и легкой) изотопов ^{238}U и ^{235}U соответственно равны 352 и 349. Их отношение, равное 1,0043, определяет идеальный (недостижимый) коэффициент разделения смеси двух изотопов урана, т.е. относительная концентрация ^{235}U , продиффундировавшего через пористую перегородку, всего в 0,0043 раза больше, чем до перегородки. Практически при пропускании UF_6 через одну пористую перегородку на одной диффузионной машине коэффициент разделения не может быть $> 1,002$, то есть концентрация ^{235}U возрастет при этом лишь на 0,2%. Чтобы получить обогащенный ^{235}U с концентрацией ^{235}U до 90%, необходимо соединить последовательно десятки тысяч газодиффузионных ячеек. В значительной мере требования к материалам и площади пористых перегородок, количеству последовательно соединенных диффузионных машин уже тогда были определены.

Комбинат № 813 (до 1949 г. назывался заводом № 813, а затем — Государственным верх-нейвинским машиностроительным заводом) начинал строиться на базе завода № 261 Наркомата авиационной промышленности. В соответствии с постановлением правительства от 1 декабря 1945 г. он был передан в ПГУ совместным приказом

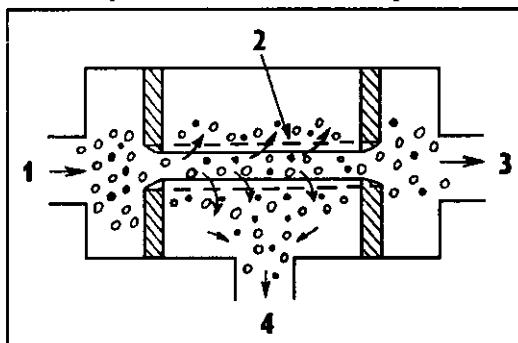


Рис. 12. Схема диффузионного процесса при обогащении урана ^{235}U :

● — ^{235}U , ○ — ^{238}U ;

1 — питание газообразным UF_6 ,
2 — пористая трубка (диффузионный фильтр), 3 — обедненный уран по ^{235}U (отвал),
4 — обогащенный уран по ^{235}U (отбор)



**АЛЕКСАНДР
ИВАНОВИЧ
ЧУРИН**
(1907—1981) —
директор
комбината № 813,
впоследствии
директор комбинатов
№ 816, 817,
а с 1957 по 1971 г. —
первый заместитель
министра среднего
машиностроения

начальника ПГУ и руководства Наркомата авиационной промышленности от 11 декабря 1945 г. Первым директором завода № 813 был назначен А.И. Чурин*.

Для строительства завода постановлением Совета Министров было организовано строительное управление № 865, которое уже в январе 1946 г. начало свою деятельность. Начальником стройки был назначен генерал-майор И.П. Бойков, а главным инженером — В.Е. Любомирский². Уже к 1 июня 1946 г. на стройке работало 6970 чел., через год число строителей достигло 16 тыс. После 1949 г. на стройке комбината № 813 работало до 25—30 тыс. строителей всех категорий [28]. Работы велись в основном вручную. Из транспортных средств в начальный период строители имели 5 паровозов, 71 автомобиль и 298 лошадей. Первые экскаваторы появились только в 1948 г. Главным проектным институтом строящегося комбината был утвержден ленинградский институт ГСПИ-11.

Разработчиками технологии первого диффузионного завода были сотрудники ЛИПАНа и специалисты из Сухуми. Основными изготовителями и разработчиками оборудования были заводы различных ведомств.

Научным руководителем диффузионного завода был назначен член-корреспондент АН СССР И.К. Кикоин, его заместителем — бывший главный конструктор Ленинградского металлического завода профессор И.Н. Вознесенский. Расчетные работы по проекту были возложены на заместителя научного руководителя (за-

* А.И. Чурин окончил Ленинградский электротехнический институт им. В.И. Ульянова (Ленина), был руководителем системы Уралэнерго.

² Главным инженером стройки до 1952 г. работал Б.М. Сердюков.

местителя директора ЛИПАНа) академика С.Л. Соболева. Практически все работы ученых и конструкторов по созданию технологии получения высокообогащенного ^{235}U регулярно рассматривались на секции № 2 НТС ПГУ, возглавляемой В.А. Малышевым. В состав секции в период с 1945 по 1953 г. входили И.К. Кикоин и А.Д. Зверев (заместитель руководителя секции с 1950 г.). Членами секции были Э.-С.А. Аркин, В.Ф. Гордеев, Д.Н. Денисов, А.С. Елян, М.Д. Миллионщиков, Б.С. Поздняков, В.И. Поликовский, Д.Л. Симоненко, Н.М. Синёв, С.Л. Соболев, М.В. Якутович.

Постановлением правительства от 27 декабря 1945 г. при ЛКЗ создается ОКБ ЛКЗ по разработке основных разделительных машин для получения обогащенного ^{235}U . Главным конструктором ОКБ назначается Э.-С.А. Аркин. При ГМЗ в начале 1947 г. тоже создается ОКБ, начальником которого по совместительству назначается Герой Социалистического Труда директор завода А.С. Елян, главным конструктором — А.М. Савин. Оба КБ работали по заданиям ЛИПАНа и его ленинградского филиала, возглавляемого членом-корреспондентом АН СССР И.Н. Вознесенским.

Как отмечается ветеранами [28, 89], большую помощь разработчикам оказал переведенный и изданный в 1946 г. Официальный отчет о разработке атомной бомбы под наблюдением правительства США. В отчете указывалось, что из четырех изучаемых в США методов разделения изотопов урана предпочтение было отдано газодиффузионному.

Научно-технический совет и руководство ПГУ в начале 1946 г. одобрили газодиффузионный метод для строящегося завода в поселке Верх-Нейвинском. Та-



**ИСААК
КОНСТАНТИНОВИЧ
КИКОИН**

(1908—1984) —

заместитель
директора
завода Д-1

по научным вопросам,
заместитель
директора ЛИПАНа,
академик с 1953 г.



**ВЯЧЕСЛАВ
АЛЕКСАНДРОВИЧ
МАЛЫШЕВ**
(1902–1957) —
заместитель
Председателя
Совета Министров,
министр танковой
промышленности,
транспортного
машиностроения,
а с 1953 по 1955 г.
среднего
машиностроения

кое решение не означало полного прекращения работ по другим методам. Под руководством Л.А. Арцимовича и Д.В. Ефремова^{*} продолжались работы по электромагнитному методу, и 21 августа 1946 г. было осуществлено первое разделение изотопов урана на ионах его фтористого соединения^{**}. Определенный успех был достигнут и в исследованиях по разделению UF_6 диффузией против потока пара, которые велись под руководством Д.Л. Симоненко в ЛИПАНе (лаборатория И.К. Кикоина). Однако, как отмечает Н.М. Синёв [28], отчет Г.Д. Смита решительно и бесповоротно подкрепил нашу позицию при выборе газодиффузионного метода в качестве основного.

Что же из опубликованного американцами было использовано при создании завода Д-1? В книге Г. Смита, в частности, сообщались основная концепция по выбору оборудования и схемы газодиффузионного завода и ожидаемые трудности:

- в качестве «рабочего газа» был выбран UF_6 , который требовал развития вакуумной техники в ранее неслыханных масштабах;
- основные трудности газодиффузионного метода были связаны с разработкой пористых перегородок и насосов-компрессоров; требовались акры перегородок и тысячи насосов;
- была применена одноступенчатая разделительная установка (с одним компрессором), и поэтому требовалось несколько тысяч ступеней;

* Руководитель КБ Ленинградского завода «Электросила»; был назначен главным конструктором разделительных электромагнитных установок.

** Разработку ионных источников проводил ЛФТИ (А.Ф. Иоффе, В.П. Жузе, В.М. Тучкевич, Ю.А. Дунаев и др.).

- наилучший способ соединения ступеней требовал многократного повторения цикла, так как количество вещества, проходящего через перегородки нижних ступеней, во много тысяч раз превышает количество обогащенного продукта, извлекаемого из последней ступени (ступени соединены в каскады);
- в любой ступени примерно половина поступающего вещества проходила через перегородку к следующей, высшей ступени, в то время как другая половина возвращалась обратно в предыдущую ступень;
- циркуляция всего количества газа в ступени осуществлялась с помощью компрессоров;
- так как поток газа через ступень значительно менялся с номером ступени в каскаде, количество и размеры насосов-компрессоров также сильно менялись от ступени к ступени;
- система циркуляции, состоящая из компрессора, перегородки, трубопровода и клапанов, была герметичной для создания в ней вакуума.

Особо подчеркивалось: смазочные вещества или уплотняющие среды не должны реагировать с рабочим газом, так же как и ни один из промышленных материалов.

Из этого перечисления можно судить о необходимом оборудовании и основных требованиях к технологии получения высокообогащенного ^{235}U . Очевидны и сложности, которые ожидали разработчиков, технологов и эксплуатационный персонал при ее освоении.

Открытая публикация американцами в официальном отчете схемы диффузионного завода, а также расчеты оптимального размещения каскадов [91] свидетельствуют о том, что они были уверены



АМО
СЕРГЕЕВИЧ
ЕЛЯН —
(1903–1965)
директор
Горьковского
машиностроительного
завода,
руководитель ОКБ



**НИКОЛАЙ
МИХАЙЛОВИЧ
СИНЁВ**
(1906–1990) —
начальник
технического
отдела завода Д-1,
впоследствии
начальник
ОКБ ЛКЗ,
заместитель
председателя
Государственного
комитета по
использованию
атомной энергии
СССР, заместитель
начальника НТУ
Минсредмаша

в недоступности для других стран воспроизведения подобной технологии получения высокообогащенного урана для атомной бомбы. Например, почти фантастически звучали технические требования на пористые перегородки для диффузионных машин, вытекающие из известных законов молекулярной физики. В этих требованиях, в частности, отмечалось [28], что диаметр бесчисленного множества отверстий в перегородке должен быть меньше 0,1 среднего свободного (до столкновения с другими) пробега молекул, который имеет порядок 0,1 мкм. Следовательно, материал перегородки должен иметь миллионы отверстий диаметром $\leq 0,01$ мкм и почти не содержать отверстий с диаметром, превышающим это значение. Отверстия не должны увеличиваться или закупориваться в результате прямой коррозии или пыли, образующейся при коррозии где-нибудь в системе. Перегородка должна быть способна противостоять напору газа в 1 атм, легко изготавливаться в больших количествах и быть однородной по качеству.

В США изучение метода диффузии серьезно было начато с середины 1941 г., и уже к концу года было доказано, что в принципе возможно разделение легкой и тяжелой фракций UF_6 посредством одноступенчатой диффузионной установки с пористыми перегородками. В отчете указывалось, что фильтр (перегородка) может быть изготовлен травлением тонкой фольги сплава цинк–серебро соляной кислотой. В предисловии к книге Г. Смита руководитель Манхэттенского проекта генерал-майор Л. Гровс, отмечая беспримерные технические достижения США, писал еще в середине 1945 г.: «Нет причин, по которым историю административно-организационных мероприятий по изготовлению атомной бомбы и основные

научные представления, послужившие фундаментом для различных практических выводов, нельзя было бы сделать достоянием широкой публики. В этой книге содержатся все научные данные, опубликованные которых не может нарушить интересы национальной безопасности». Нельзя было полностью признать, что разрабатываемые электромагнитный, центрифужный и другие методы получения обогащенного ^{235}U являются неперспективными и что они не использовались в США в интересах национальной безопасности.

Учитывая сложности, которые необходимо было преодолеть при разработке газодиффузионного и других методов получения высокообогащенного ^{235}U , можно понять, почему были привлечены еще в 1945 г. к этим работам немецкие специалисты (институты А и Г, размещенные в санаториях г. Сухуми^{*}). Часть этих специалистов имели еще довоенный опыт по диффузии газов.

В начале 1946 г. был объявлен закрытый конкурс на создание плоских фильтров. Технические условия на разработку их различных вариантов выдавал ЛИПАН. Среди вариантов были и невозможные для реализации. Как пишет Н.М. Синёв, было шесть вариантов. Назовем лишь три из них:

- получение красно-медных плоских фильтров путем травления цинка в тонкой латунной пластине;
- получение никелевых пористых пластин методом пробивки в них мелких игольчатых отверстий на специально построенном механическом приспособлении;
- изготовление пористой ткани путем особой укладки и склейки специальных волокон.

Всего в конкурсе кроме ЛИПАНа участвовали 15 организаций. Удачным оказался вариант изготовления пористой пластины из мелкодисперсного никелевого порошка с формированием заготовки в пресс-форме, установленной на вибростенде, с последующим спеканием. Он был разработан Московским комбинатом твердых сплавов (МКТС) Минцветмета СССР совместно с сотрудниками ЛИПАНа². Эти фильтры, хотя и имели невысокие параметры, были приняты для производства. Технология получения тонкодисперсных никелевых порошков была еще не отработана.

Спешка в подготовке к созданию технологии получения обогащенного ^{235}U объяснялась главным образом тем, что в 1946 г. США продолжали совершенствовать ядерное оружие. В 1946 г. на атолле Бикини в Тихом океане были взорваны две атомные бомбы. Кроме того, в июне 1946 г. Комитет начальников штабов США

^{*} На их базе был организован Сухумский физико-технический институт.

² Директор МКТС — С.П. Соловьев, главный инженер — Г.Н. Левин; от ЛИПАНа — И.К. Кикоин, В.С. Обухов, В.Х. Волков и др.

закончил разработку первого подробного плана атомной войны против СССР под кодовым названием «Пинчер» [24]. В плане предусматривалось нанесение по 20 городам ядерного удара 50 бомбами. Поэтому Специальный комитет обеспечивал «зеленую улицу» всем работам, в том числе и работам немецких ученых, по скорейшему получению делящихся материалов.

Кроме плоских фильтров, велись работы и в других направлениях. Немецкими учеными в Сухуми под руководством П. Тиссена и Р. Райхмана в 1948 г. были получены первые результаты по созданию трубчатых фильтров двух типов: каркасных и керамических. Под руководством П. Тиссена были изготовлены первые каркасные фильтры. Их получали путем нанесения на никелевую сетку, имевшую 7–10 тыс. отверстий на 1 см^2 , мелкого порошка из карбонильного никеля и последующего спекания его в печи. Разработчиками второго типа фильтров были Р. Райхман и советские инженеры В.Н. Еремин и Н.Н. Еремина. Керамические фильтры изготавливали выдавливанием тонкостенной трубки через кольцевой мундштук тестообразной массы из порошка закиси никеля (со связующими добавками) и последовательным восстановительным обжигом в водородной печи [28].

Оба типа трубчатых фильтров, разработанных в основном под руководством немецких ученых, после испытаний в ЛИПАНе были одобрены для применения на диффузионных машинах второго поколения. Решение это принималось в драматической ситуации, так как мнения разработчиков двух КБ были диаметрально противоположными. Эта проблема подробно рассматривалась на секции № 2 (председатель В.А. Мальшев) и на НТС ПГУ. Было решено на подмосковный завод № 12 перевести из Сухуми лабораторию П. Тиссена, а на МКТС — лабораторию В.Н. Еремина. На этих двух заводах и было в 1949 г. организовано промышленное производство трубчатых и плоских фильтров.

Многие заводы страны разных отраслей промышленности принимали участие в работах по выполнению программы № 1, в частности при создании диффузионного производства. Так, для освоения каркасных фильтров необходимо было изготовить сетку из никелевых нитей толщиной 0,05 мм. Для ее получения нужны были алмазные фильеры. Кольчугинский завод Минцветмета СССР в короткие сроки освоил технологию производства тончайшей никелевой проволоки, позволившую получить мелкую сетку с количеством отверстий на 1 см^2 до 10 тыс. В течение ряда лет завод № 12 и МКТС обеспечивали своей сверххрупкой, сверхсекретной и сверхчистой продукцией заводы развивающейся промышленности по диффузионному методу обогащения ^{235}U . Вакуумные насосы, гелиевые течеискатели разрабатывали центральная завод-

ская лаборатория Московского электровакуумного завода (директор — С.А. Векшинский) и другие предприятия.

Основные изготовители диффузионных машин — ЛКЗ и ГМЗ за короткое время организовали их выпуск. Были построены крупные цехи гальванических покрытий всех внутренних полостей машин, контактирующих с UF₆. Этих поверхностей — гектары, а самих деталей — многие тысячи. Технологический процесс требовал не только промывки и тщательного обезжиривания, но и проведения в специальных ваннах омеднения, а затем равномерного гальванического никелирования. После этих операций все никелированные поверхности подвергались тщательной ручной шлифовке, что позволяло резко уменьшить коррозию в среде фтора. «Это была адская, трудоемкая, грязная, монотонная ручная работа» [28]. Каждая деталь, узел и в целом машина в сборке подвергались приемке не только контролерами ОТК заводов, но и приемщиками контрольно-приемочной инспекции ПГУ. В период с 1947 по 1949 г. Приемочную комиссию возглавлял генерал-майор авиационной службы профессор В.И. Поликовский — директор Центрального института авиационного моторостроения (ЦИАМ), затем ее руководителями были Л.Л. Симоненко (1949–1955 гг.), член-корреспондент АН СССР М.Д. Миллионщиков* (1956–1973 гг.), а позднее Н.М. Лысцов. Все они были сотрудниками ЛИПАНа.

В ПГУ основная ответственность за координацию разработок, изготовление оборудования, поставку необходимых материалов и контроль за сроками строительства завода Д-1 возлагалась на 8 Управление (начальник А.М. Петросьянц). Вот что вспоминает об этом времени А.М. Петросьянц [92]: «Мы подготовили вместе с научным руководителем большой и развернутый проект постановления правительства, где изложили все наши просьбы и требования, и послали его в Специальный комитет. Через пару дней звонок:

— И вам все это надо?!

— Да, — отвечаю я.

— Приезжайте».

Это был вызов председателя Специального комитета Л.П. Берии. В частной беседе с автором этих строк А.М. Петросьянц рассказывал, что, выслушав его ответы на ряд вопросов, Берия раздраженно спросил: «А птичьего молока вам не нужно?» «Ну, — подумал я, — сейчас будет разнос, — и ответил:

— Да, все это нам надо.

После некоторого времени снова вопрос:

— А не забыли ли еще чего?

— Нет, мы все учли».

* В 1944–1949 гг. работал в Институте механики; с 1949 г. — заведующий отделом, с 1960 г. — заместитель директора ЛИПАНа; с 1962 г. — академик, вице-президент АН СССР.

В результате оперативного рассмотрения документ, мобилизующий целый ряд заводов страны, институтов, КБ и строительно-монтажных организаций, был подписан.

Ответственность работников ПГУ, ученых и руководителей завода за обеспечение исполнения и объективность запросов была чрезвычайной. В то же время эта встреча указывает на вдумчивое и ответственное отношение руководителя Специального комитета к обеспечению выполнения программы № 1.

Получение шестифтористого урана

Шестифтористый уран — гексафторид (UF_6) — оказался самым приемлемым продуктом — газом, который, диффундируя через пористые перегородки, давал возможность отделять более тяжелые молекулы урана от легких. Преимущество его было еще и в том, что природный ^{19}F не имел других изотопов. Фтор токсичен, и предельно допустимая концентрация его в воздухе составляет $2 \cdot 10^{-4}$ мг/л. Высокая реакционная способность фтора приводит к тому, что даже следы влаги, смазочных смесей в оборудовании в атмосфере фтора загораются. Основным источником фтора является плавиковый шпат — флюорит (CaF_2), в котором его содержится 48,7%. В небольших количествах он есть и в природных фосфатах. В атомной промышленности фтор используется для получения двух соединений урана: тетрафторида (UF_4) и UF_6 , который является входным продуктом диффузионного производства. Сам фтор и эти два продукта в первые годы производились на заводах Наркомхимпрома. Как отмечается учеными-ветеранами [90], UF_4 можно получать обработкой шестивалентных соединений урана дешевыми реагентами — фтористым водородом, технической плавиковой кислотой. Реакция же взаимодействия UF_4 с фтором представляет собой более сложный процесс, который протекает в несколько стадий. Сначала по реакции $2UF_4 + F_2 \rightarrow 2UF_5$ получается пентафторид урана, а затем по реакции $2UF_5 + F_2 \rightarrow 2UF_6$ получается UF_6 . Скорость первой реакции выше скорости второй, и к моменту, когда весь UF_4 превратится в UF_5 , UF_6 либо вообще не образуется, либо его образуется очень мало. При комнатной температуре фторирование идет очень медленно. В интервале же 250–600°C скорость реакции почти не зависит от температуры. При процессе фторирования (рис. 13, 14) могут образовываться промежуточные фториды (U_2F_9 и U_4F_{17}) [90], а скорость процесса кроме температуры зависит и от физико-химических характеристик исходного продукта. Исходным же продуктом для получения UF_6 были не только соединения природного урана, но и конечный продукт радиохимического завода — регенерированный уран, в котором после выделения плутония могут содержаться кроме соединений урана

следы других примесей*. Поэтому практически одновременно с решением о строительстве первого диффузионного завода было принято решение об организации промышленного производства UF_6 .

Первые граммы UF_6 были получены в НИИ-42 Наркомхимпрома. Фторирование регенерированного урана осложнялось тем, что последний содержал следы γ -активного изотопа ^{232}U . Распределение радиоактивных примесей изучалось позже под руководством профессора Э.М. Центера [93]. Непрореагировавший твердый продукт при фторировании UF_4 (см. рис. 13) ссыпается в шлакоприемник, концентрируя имеющиеся радионуклиды. Однако в начальный период работы из-за малых сроков облучения урана в ядерном реакторе содержание ^{232}U должно быть ничтожным, несколько не увеличивая радиоактивность регенерата урана.

Приказом наркома химической промышленности М.Г. Первухина от 8 октября 1946 г. заводу № 752 в Кирово-Чепецке² поручалось организовать производство UF_6 . В конце 1949 г. на заводе были построены следующие цеха: фтора (корпус № 2), фтористого водорода (корпус № 1), плавиковой кислоты (корпус № 43), UF_6 , регенерации отходов и складов сырья и готовой продукции. Были построены и вспомогательные цеха, включая холодильные и кислородные установки (корпус № 5), цех по получению UF_4 (корпус № 53), из которого затем получали UF_6 .

Гексафторид урана — легколетучее вещество. При давлении <1 атм, т.е. в небольшом вакууме, и температуре $<56^\circ C$ UF_6 находится в газообразном состоянии. При более низких температурах газ превращается в белые кристаллы плотностью около $5,1$ г/см³. При нагревании баллона UF_6 $>65^\circ C$ и давлении $>1,5$ атм его можно перевести в жидкую фазу [28, 90]. UF_6 энергично взаимодействует с водой, образуя смешанный оксид UO_2F_2 и плавиковую кислоту. Бурно протекают реакции взаимодействия с органическими веществами и большинством металлов. Если молекула UF_6 отдаст часть своего фтора, то UF_6 немедленно превращается в устойчивое твердое соединение — UF_4 , который в виде мелкодисперсного зеленого порошка выпадет на различные поверхности оборудования. Образование плавиковой кислоты при взаимодействии UF_6 с водой, взаимодействие с любыми соединениями, смазками потребовали огромных усилий для разработки методов и оборудования по обращению с ним в производстве обогащенного урана. Детально о разработке технологии получения UF_6 и

* В первые годы работы комбината № 817 регенерированный уран содержал 0,69–0,7% ^{235}U . Однако очистка урана от продуктов деления велась не на должном уровне.

² Завод создавался в 1938 г. в районе устья реки Чепцы (приток реки Вятки) и назывался Кирчепхимстрой. В систему Минсредмаша из Минхимпрома был передан только в 1958 г. До 1947 г. директором завода был М.В. Крычков, а затем Я.Ф. Терещенко, главным инженером в 1949–1950 гг. работал В.А. Хренов, а с 1950 г. — Б.П. Зверев.

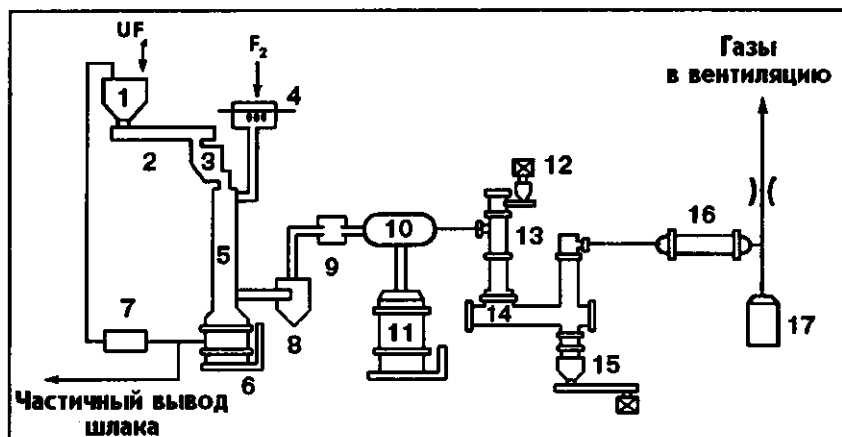


Рис. 13. Схема получения UF_6 из очищенного UF_4 :

1 – бункер титания; 2 – шин; 3 – распределитель; 4 – подогреватель фтора; 5 – пламенный реактор; 6 – шлакоприемник; 7 – измельчитель шлака; 8 – циклотронный сепаратор; 9 – фильтр; 10 – головной конденсатор; 11, 17 – приемник UF_6 ; 12 – бункер UF_4 ; 13 – хвостовой реактор; 14 – шиновая печь; 15 – приемник промежуточных фторидов; 16 – хвостовой конденсатор

обращении с ним написано ветеранами отрасли Н.П. Галкиным [90], А.С. Леонтичуком, Б.В. Грозовым, А.И. Корелиным и Г.П. Хандориным (частные сообщения). Они были активными создателями технологии получения UF_6 на заводах, которые позднее строились в системе Минсредмаша, и поочередно работали руководителями этого производства*. Как уже отмечалось, предприятия по производству UF_6 и других материалов были переданы в нашу отрасль из Минхимпрома. При передаче в Минсредмаш КирОВО-Чепецкого завода в его составе были следующие цеха:

- № 1 – производство фтористого водорода и плавиковой кислоты;
- № 2 – производство UF_6 ;
- № 93 – производство UF_4 ;
- № 49 и 105 – производство 6Li ;
- № 110 – производство хлористого кальция;
- № 82 – производство хлора.

Под руководством А.С. Леонтичука впоследствии разрабатывалась новая технология получения UF_6 прямым фторированием оксидов урана.

* А.С. Леонтичук после работы в Томске-7 главным инженером и директором комбината № 816 длительное время работал главным инженером 4 ГУ Минсредмаша. А.И. Корелин после работы в Томске-7 с 1990 г. работает директором Радиового института им. В.Г. Хлопина. Г.П. Хандорин в настоящее время – директор комбината № 816.

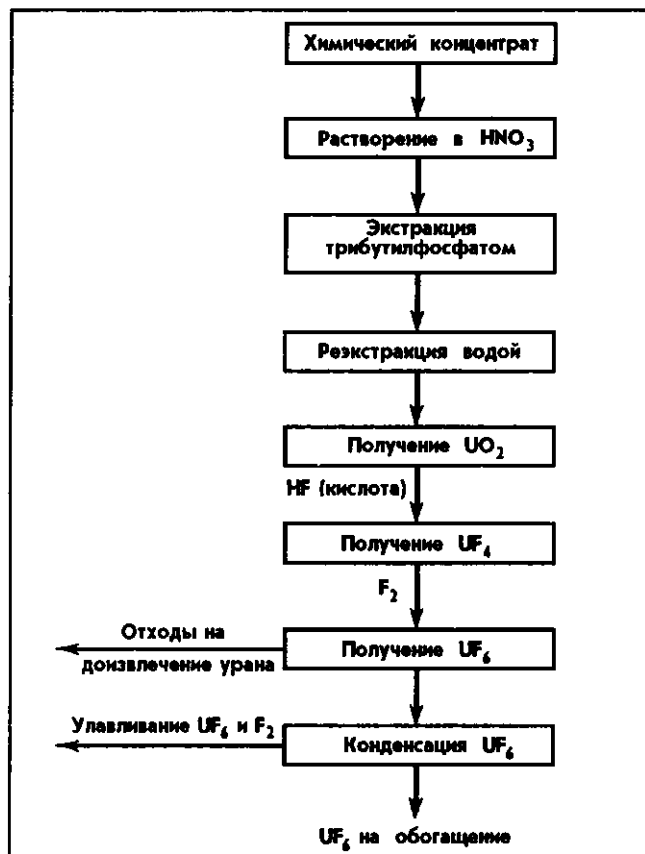


Рис. 14. Технологическая схема получения UF_6

Сложности пускового периода газодиффузионного завода комбината № 813

Завод Д-1 создавался на Среднем Урале на территории предприятия авиационной промышленности, переданного в ПГУ вместе с жилым поселком. Основное технологическое оборудование должно было размещаться в недостроенном корпусе площадью около 50 тыс. м². Место было удобное, рядом находилась железнодорожная станция, а в долине реки Нейвы были два глубоководных искусственных озера*. Рядом проходила линия электропередач, и просто решалась проблема электрообеспечения. Все это было очень важно, так как вновь создаваемое

* В поселке Верх-Нейвинском в XVIII в. заводчик Демидов построил металлургический завод, использующий энергию реки Нейвы, перегородженной в пойме в междугорьях широкой земляной плотиной.

диффузионное производство было очень энергоемким. Для получения 1 кг урана 90%-го обогащения изотопом ^{235}U нужно было затратить примерно 600 тыс. кВт·ч электроэнергии для питания электродвигателей компрессоров, прокачивающих газ через пористые перегородки. При этом расходовалось 175–220 кг природного урана [28]. В зависимости от глубины извлечения ^{235}U обедненный поток UF_6 содержал только 0,2–0,3% ^{235}U и шел в отвал. Эти отвалы конденсировались в твердую фазу и в специальных баллонах (из стали) поступали на склады для длительного хранения и последующего использования.

В соответствии с проектным заданием, выданным ЛИПАНОм и утвержденным ПГУ, ГСПИ-11 в апреле 1946 г. приступил к разработке проекта. Главным инженером проекта был назначен И.З. Гельфанд (с 1948 г. — М.М. Взоров). Ведущими проектировщиками были М.М. Добулевич, В.Ф. Чекалов, И.С. Бройдо, С.С. Майзель, Г.Г. Водопьянов, М.И. Чухраев и др.

Под руководством академика С.Л. Соболева были проведены расчеты принципиальной схемы построения и взаимодействия 56 каскадов, составленных из тысяч машин нескольких типоразмеров. Аппаратура для автоматического регулирования всех машин и каскадов диффузионного завода была разработана конструкторами ОКБ ЛКЗ. Изготовил ее ЛКЗ как для диффузионных машин собственной конструкции, так и для машин, поставляемых ГМЗ.

Разработка диффузионных машин велась с самого начала по проектному заданию, отличающемуся от американского — одноступенчатого варианта. В одноступенчатой конструкции каждую диффузионную ячейку обслуживал один компрессор.

Научные руководители газодиффузионного метода И.К. Кикоин и И.Н. Вознесенский в начале 1946 г. выдали ГМЗ и ОКБ ЛКЗ задание на разработку многоступенчатых машин*, видимое преимущество которых заключалось в том, что на одном валу электродвигателя устанавливались десятки компрессоров центробежного типа, разделенных пористыми перегородками. Такая машина являлась самостоятельной разделительной ступенью газодиффузионного каскада. Несмотря на большую работу, в конце 1946 г. был сделан вывод о том, что концепция многоступенчатой машины ошибочна из-за громоздкости, сложности и нетехнологичности конструкции². В соответствии с решением ПГУ к концу 1946 г. на двух заводах были изготовлены

* ЛКЗ разрабатывал 24-ступенчатую диффузионную машину, а ГМЗ — 30-ступенчатую.

² Размещение на одном валу 24 центробежных колес, а в едином корпусе машины многих (кривых) каналов для подвода и отвода газа, компоновка за каждым компрессором холодильников и пакетов из плоских пористых перегородок значительно усложнили конструкцию системы и снизили ее эффективность. Две изготовленные на ЛКЗ разделительные машины оказались неработоспособными.

в металле головные партии из 20 одноступенчатых машин малой производительности. Это обстоятельство привело к задержке пуска в эксплуатацию завода Д-1.

Опытное конструкторское бюро ГМЗ разрабатывало машины с кодовым названием ОК-7, ОК-8 и ОК-9 с массовым расходом UF_6 соответственно 30, 90 и 240 г/с при его давлении перед пористыми перегородками 19 мм рт. ст. ОКБ ЛКЗ проектировало машины Т-6 и Т-15 на аналогичные параметры.

Проведенные в ЛИПАНе эксплуатационные испытания машин ОК-7 и Т-15 показали, что машина ОКБ ЛКЗ не удовлетворяет техническим требованиям (герметичность, надежность подшипниковых опор и т.д.). Было принято решение (секция № 2 НТС, председатель – В.А. Малышев) комплектовать завод Д-1 только машинами ГМЗ*. Неудачи при разработке многоступенчатой машины и машины Т-15, обсуждение их в ПГУ и Специальном комитете не прошли бесследно для разработчиков. В июне 1947 г. скоропостижно скончался профессор И.Н. Вознесенский (не выдержало большое сердце), а вместо Э.-С.А. Аркина главным конструктором ОКБ ЛКЗ был назначен Н.М. Синёв, работавший в годы Великой Отечественной войны заместителем главного конструктора ЛКЗ и Уральского комбината по тяжелым танкам. Одновременно руководитель секции № 2 В.М. Малышев, работавший тогда министром транспортного машиностроения, своим приказом укрепил кадрами и расширил экспериментальную базу ОКБ ЛКЗ, перевел ее на круглосуточную работу. Э.-С.А. Аркин был назначен заместителем главного конструктора ОКБ.

Завод Д-1 был скомпонован из 6200 последовательно соединенных машин, в том числе:

ОК-7 – 2756 машин-ступеней

ОК-8 – 2100 “

ОК-9 – 1344 “

«Выносные» двигатели имели специальную керамическую перегородку, которая герметично отделяла статорный объем электродвигателя от ротора.

Машины были скомпонованы в 56 каскадов, связанных между собой коммуникациями, для передачи и отбора обогащенной фракции газа и обедненного ^{235}U отвального потока.

Все оборудование должно было работать непрерывно, так как при остановке происходило перемешивание различных по содержанию ^{235}U фракций UF_6 . Все каскады были разбиты на группы по 12 машин. Такие группы можно было с помощью вакуумных запорных клапанов отключать от работающего каскада и до мини-

* До 1954 г. все машины и даже ядерные реакторы, разрабатываемые в ОКБ ГМЗ, имели индекс ЛБ (Лаврентий Берия), позже – ОК (особая конструкция, машины ОК-7, ядерные реакторы ОК-180 и т.д.).

мума сократить смешивание уже частично разделенных изотопов урана во время остановок и ремонта.

Сверхжесткие сроки пуска завода Д-1 потребовали на ЛКЗ и ГМЗ реконструкции ряда крупных цехов и массового изготовления диффузионных машин еще до окончания их комиссионных испытаний и приемки к эксплуатации. В начале 1948 г. эшелоны с машинами ОК по железной дороге стали поступать в поселок Верх-Нейвинский. Весь 1948 г. Государственная приемная комиссия проводила ускоренные испытания машин ОК-7, ОК-8 и ОК-9. Эту комиссию возглавлял директор ЦИАМ профессор В.И. Поликовский, крупнейший специалист по авиакомпрессорам. Ускоренные испытания были неполными, но комиссия выдала рекомендации запуска машин в серийное производство. Машины монтировались на заводе Д-1 по мере поступления.

Уже 22 мая 1948 г. по докладу ПГУ и научного руководителя И.К. Кикоина было принято постановление правительства, разрешающее предъявить первую очередь завода к пуску. Этим же постановлением А.И. Чурип переводится главным инженером завода Д-1, а директором назначается А.Л. Кизима*. Бывший главный инженер завода Д-1 М.П. Родионов назначается начальником производства, а главный конструктор ОКБ ЛКЗ Н.М. Синёв — начальником технического отдела завода Д-1. И.К. Кикоин утверждается заместителем директора по научным вопросам. Начальниками ведущих цехов назначаются специалисты-конструкторы ЛКЗ и ГМЗ. Так, начальником цеха малых машин (ОК-7) становится опытный авиаинженер Г.Г. Летемин, цеха средних машин (ОК-8) — Н.В. Алавадин (начальник испытательных стендов ОКБ ЛКЗ), цеха больших машин (ОК-9) — руководитель опытного производства ГМЗ И.И. Африкантов². Естественно, эти назначения не всегда были добровольными.

В 1948 г. штатное расписание завода было определено в 600 чел., а через 2 года численность персонала составляла уже 3500 чел. Инженерно-технический персонал завода Д-1 проходил ускоренный курс обучения в ЛИПАНе. Учебу проводили не только И.К. Кикоин, С.Л. Соболев, но и их сотрудники: Н.А. Колокольников, Я.А. Смородинский, А.Г. Плотнокина и др.

На заводе Д-1 еще в 1946 г. создается ЦЗЛ, которую сначала возглавлял П.А. Халилеев, а с 1949 по 1953 г. — И.К. Кикоин. Центральная заводская лаборатория была сформирована из опытных специалистов, переведенных из других институтов и заводов страны, а также из молодых специалистов.

* В годы Великой Отечественной войны работал главным инженером Уралмаша, а после войны был назначен директором ЛКЗ.

² По просьбе директора ГМЗ А.С. Ельяна назначение было отменено из-за неполадок при пуске каскадов ОК-7. Начальником цеха был назначен П.С. Микулович, переведенный с Уралмаша. С 1951 по 1969 г. И.И. Африкантов работал главным конструктором ОКБ ГМЗ.

Конструкторским бюро завода руководил В.Д. Лурье, группу наладки и обслуживания контрольно-измерительной аппаратуры возглавлял М.Л. Райхман, переведенный из лаборатории № 2. Б.В. Жигаловский, тоже переведенный из лаборатории № 2, возглавлял группу расчетов пусковых и переходных режимов вновь вводимых каскадов. На заводе организуется контроль изотопного состава урана (И.С. Израилевич, Н.А. Шеховцев). В управлении производством создаются специальные пусконаладочные бюро. В них работали А.И. Савчук и П.П. Харитонов, Б.С. Пужаев и С.А. Калитин, А.С. Марциоха и В.П. Масленников, В.Д. Пушкин и Д.М. Левин. Организуются службы главного энергетика (А.И. Рыбинцев), главного механика (В.Н. Осипов) и другие подразделения.

По завершении пусконаладочных работ сразу же на заводе начались неприятности. При выходе на рабочий режим стали выходить из строя диффузионные машины (всех трех типов). Однако завод в ноябре 1949 г. выдал первую готовую продукцию в виде UF_6 , обогащенного до 75% ^{235}U . Выходили из строя шарикоподшипники, электроприводы компрессора, имеющие в рабочем режиме частоту вращения 6000 об/мин. Подшипники выходили из строя через несколько сотен часов работы, а некоторые нормально вращались только несколько десятков часов. Началась замена вышедших из строя компрессоров. Работа по замене и ремонту машин была мучительной, так как до аварийной остановки машины были заполнены химически агрессивным, слаборадиоактивным UF_6 [28]. Однако не следы радиоактивности в UF_6 были причиной выхода из строя подшипников у компрессоров диффузионных машин. Выбранные конструкторами люфты, допуска и посадки не учитывали реальное термическое расширение деталей в подшипниковой паре, происходящее при недостаточном теплоотводе в вакуумной среде. Было принято решение заменить на всех машинах (около 5500) подшипники, откорректировать на машиностроительных заводах допуска и заменить их на машинах, установленных на заводе Д-1.

Комиссия ПГУ, которую возглавлял главный инженер 2 Управления А.А. Задикян^{*2}, выяснила и вторую причину, препятствующую нормальной работе завода Д-1: недопустимо высокую коррозию оборудования, связанную с разложением рабочего газа — UF_6 . Это приводило к тому, что на конечных каскадах практически не достигалось высокого обогащения ^{235}U , так как UF_6 разлагался и превращался в порошок UF_4 , который оседал на стенках машин.

* Сначала работал в Сухуми. Впоследствии — директор Союзного научно-исследовательского института приборостроения (СНИИПа) в Москве.

*2 Крупнейший инженер Наркомцветмета. До 1947 г. был главным инженером Главникельшолва и Главникелькобальта, до 1958 г. — главным инженером и заместителем начальника 2 Управления ПГУ, с 1953 по 1956 г. — главным инженером 4 ГУ Минсредмаша (получение ^{235}U и плутония), впоследствии — ученым секретарем НТС.

Для выработки рекомендаций по обеспечению работоспособности завода Д-1 были привлечены ведущие физикохимики и химики из институтов АН СССР, а также немецкие физикохимики, работавшие в Сухуми. Среди наших крупнейших ученых были академик А.Н. Фрумкин, член-корреспондент А.П. Виноградов, профессора И.В. Тананаев, С.В. Карпачев, В.А. Каржавин и др. Более месяца они пробыли на заводе. Путем разборки многих машин было установлено, что электродвигатели компрессоров имели незащищенные поверхности (железные листы для статора и ротора), а повышенная температура мотора в работающем двигателе дополнительно ускорила разрушение UF_6 . Было решено в машинах ОК-7 и ОК-8 после их очистки от UF_4 заменить двигатели на «выносные», как в машинах ОК-9, ввести пассивирующую обработку внутренних поверхностей оборудования, снизить температуру охлаждающей воды. Были заменены двигатели примерно в 5 тыс. машин. По предложению П. Тиссена и В.А. Каржавина стали проводить общую пассивацию внутренних поверхностей машин всех каскадов вместе с трубопроводами с помощью нагретой фторо-воздушной смеси. Для сокращения до минимума попадания в коммуникации влажного воздуха было принято решение построить на заводе Д-1 цех получения сухого воздуха. Он был введен через год производительностью 40 тыс. $m^3/ч$. Подача сухого воздуха проводилась через герметичные воздухопроводы большого сечения, снабженные байпасами и специальными задвижками. Кроме того, начальником технического отдела завода Н.М. Синёвым было предложено дополнить каскады новой концевой мини-машиной ОК-6. Это предложение было реализовано в кратчайшие сроки. Проведенные мероприятия позволили в скором времени получить высокообогащенный уран с концентрацией ^{235}U 90% на газодиффузионном каскаде.

Для укрепления эксплуатационного персонала специалистами были сделаны перестановки и в техническом руководстве завода. Заместителем научного руководителя завода был назначен профессор М.В. Якутович, переведенный из Уральского отделения АН СССР. Находящиеся в длительной командировке сотрудники лаборатории № 2 были переведены на штатные должности завода. Среди них М.Л. Райхман, А.С. Марциоха, Н.М. Сагалович, Н.А. Колокольцев, И.И. Калганов и др. В ноябре 1949 г. А.Л. Кизима был освобожден от руководства заводом Д-1 и директором был снова назначен А.И. Чурин, а главным инженером — М.П. Родионов*.

* Впоследствии директор комбината № 813, а затем директор ФЭИ в Обнинске. На комбинате № 813 после М.П. Родионова главным инженером, а затем директором работал И.Д. Морохов, ставший впоследствии заместителем министра среднего машиностроения. После И.Д. Морохова в течение 26 лет директором комбината № 813 работал А.И. Савчук.

К 1950 г. диффузионная технология была освоена в СССР, и можно было ежегодно получать по несколько десятков килограммов ^{235}U 90%-го обогащения [28].

Через определенные трудности до нас прошли и США, пуская свой первый диффузионный завод в Ок-Ридже. Уместно напомнить приведенные Г. Смитом утверждения: «Вероятно, больше, чем какая-либо другая группа в Манхэттенском проекте, группа, работавшая над газовой диффузией, заслуживает награды за храбрость и настойчивость, так же как и за научные и технические дарования» [28].

За обеспечением работы завода Д-1 очень внимательно следили руководители не только ПГУ, но и Специального комитета. На заводе весной 1949 г. безвыездно 3 мес находился М.Г. Первухин. Как вспоминает ветеран нашей промышленности А.М. Петросьянц, на диффузионный завод в 1949 г. вместе с руководством ПГУ прибыл председатель Специального комитета, член Политбюро Л.П. Берия [92]. Собрав руководящий состав (научный и заводской) в два десятка человек, выслушав доклады И.К. Кирина и А.М. Петросьянца, несколько сообщений о ходе дела и тупике, в который уперся диффузионный процесс, он прервал совещание и заявил буквально следующее (стенограммы не было): «Все, что вы просили и требовали, страна дала в избытке при всех своих трудностях. Поэтому даю Вам срок три месяца на решение всех проблем по пуску завода. Но предупреждаю: не выполните — готовьте сухари. Пошады не будет. Сделаете все как надо — наградим». И уехал. А слов на ветер он не бросал [92]. Но коллектив конструкторов и ученых уже знал причины неудач и без угроз и строгих наставлений делал все, чтобы добиться решения проблемы. Усилия коллективов — участников пуска завода закончились успешно. Вскоре Л.П. Берия выполнил свое обещание. За пуск завода Д-1, обеспечившего получение конечного продукта с обогащением 90%, большой группе ученых, конструкторов, инженеров, техников и рабочих были вручены правительственные награды. В 1951 г. за создание диффузионных машин и комплектующего оборудования, за их серийное производство были присуждены Сталинские премии:

- сотрудникам ГМЗ: А.С. Еляну, В.Д. Максименко, А.И. Савину, А.Е. Соколову, К.В. Бородину, Е.Н. Черномырдику, А.С. Калинин, а также заместителю министра вооружения В.М. Рябикову;
- сотрудникам ЛКЗ: Н.М. Синёву, Э.-С.А. Аркину, А.И. Захарьину, В.Я. Черному, Х.А. Муринсону, Н.А. Сорокину, а также министру транспортного машиностроения В.А. Малышеву.

Премии получили работники ЛИПАНа, ГСПИ-11, комбината № 813 и представители других заводов и организаций, активно участвующих в пуске завода Д-1*.

Серьезные проблемы были решены в дальнейшем при создании промышленных газодиффузионных каскадов². Была достигнута необычно высокая герметичность каскада, в котором насчитывалось десятки тысяч фланцевых соединений. Как отмечали ветераны [90], представление о герметичности можно получить из следующего примера: «Если откачать все объемы завода до глубокого вакуума, прекратить откачку и закрыть их, то давление, как известно, будет постепенно возрастать вследствие натекания воздуха. Так вот, до того момента, когда давление повысится до 0,5 атм, пройдут сотни лет». По мере освоения технологии совершенствовалась эксплуатация завода, модернизировалась система регулирования потоков легкой и тяжелой фракций UF_6 в каждой ступени, при этом задача осложнялась тем, что поток в конце каскада почти в миллион раз меньше потока газа через головную ступень. Поэтому в конце каскада стоят машины, размеры которых во много раз меньше современных машин, стоящих в начале процесса (рис. 15).

Одним из основных параметров, характеризующих диффузионную машину, является единица работы разделения (ЕРР). Разделительную мощность ступени принято измерять работой, совершаемой за один год – ЕРР/год. Разделительная работа характеризует расход энергии на разделение изотопов, меру физических усилий, совершаемых при разделении изотопов урана, и зависит от концентрации изотопов в исходном сырье, обогащенном продукте и отвале (хвостах). ЕРР прямо пропорциональна величине отбора обогащенного продукта.

Размеры газодиффузионных заводов весьма внушительны. Для сравнительно небольшого завода, рассчитанного, например, на получение 1 кг урана в сутки с концентрацией ^{235}U около 90%, в отвал (обедненный уран) уйдет 220 кг урана с содержанием ^{235}U около 0,3%. Полная площадь фильтров – пористых перегородок на таком заводе будет насчитывать многие гектары. Суммарный поток UF_6 составит 150 тыс. т/сут, что примерно в 100 миллионов раз больше получаемого высокообогащенного ^{235}U [90]. При работе газодиффузионного завода внутри ступеней в машинах и вспомогательном оборудовании должно постоянно находиться очень большое количество UF_6 .

Посетитель, впервые оказавшийся в цехах газодиффузионного завода, увидит в помещениях вплотную стоящие машины, которыми заполнены все площади цеха (рис. 16).

* С конца 1949 г. – комбинат № 813. В его составе были кроме завода Д-1 строящиеся заводы Д-3, Д-4 и др.

² Завод Д-1 проработал до конца 1955 г. и был остановлен в связи с увеличением объема производства и пуском более мощных диффузионных заводов.

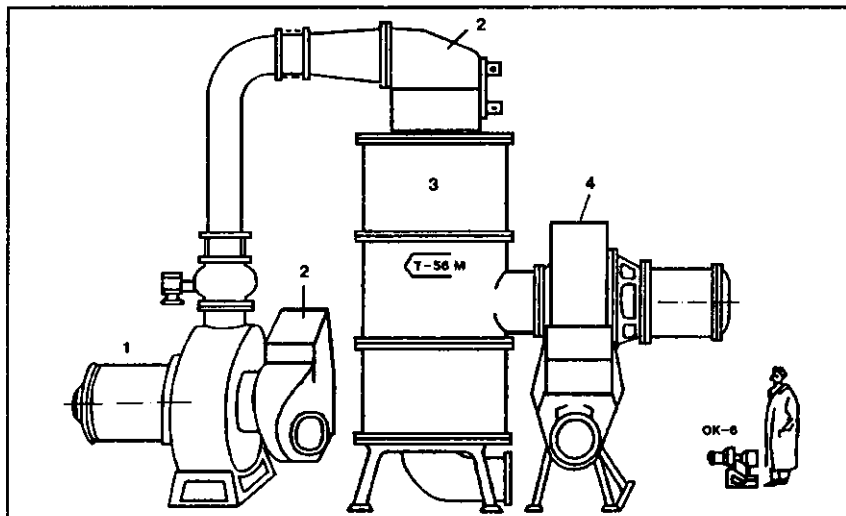


Рис. 15. Самая большая и самая маленькая диффузионные машины (Т-56М и ОК-6):

*1, 4 – компрессоры полного и половинного расхода соответственно;
2 – холодильник; 3 – делитель*

После отладки производства на заводе Д-1 и выпуска более совершенных диффузионных машин в 1950–1951 гг. на комбинате № 813 вводится завод Д-3 (директор В.Д. Новокшенов, главный инженер И.С. Парахнюк). В 1950 г. было также принято решение о строительстве следующего завода – Д-4 (главный инженер А.И. Савчук, главный механик И.Н. Бортников). На заводе Д-3 устанавливаются 2242 машины разработки ОКБ ЛКЗ: Т-45, Т-46, Т-47, Т-49*. Машины Т-45 и Т-46, как и машины типа ОК, имели плоские фильтры, остальные – трубчатые. Для обеспечения энергоснабжения завода Д-3 потребовалось строительство электростанции электрической мощностью 75 МВт.

Заводы Д-4 и Д-5 комплектовались более производительными машинами. Характеристики диффузионных машин, которые были разработаны, изготовлены и в сверхкороткие сроки установлены на заводах комбината, приведены в табл. 19. Потребляемая электрическая мощность завода Д-4, который был введен в эксплуатацию в декабре 1952 г. (хвостовая часть – в IV кв. 1953 г.), составила 100 МВт. Завод Д-5 был рассчитан на размещение технологического оборудования в корпусах общей площадью 130 тыс. м², или 13 га.

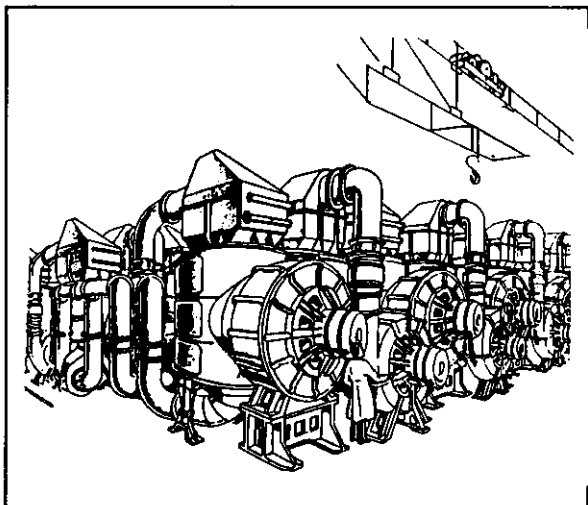
* В указанных машинах порядковый номер (цифры) определял год после победы в Великой Отечественной войне.

К началу 1953 г. на заводах комбината № 813 работало около 15 тыс. диффузионных машин. Фактически потребляемая электрическая мощность составляла 250 МВт. Из созданных промышленниками Демидовыми озер-прудов на реке Нейве через систему машин диффузионных заводов ежедневно прокачивали >1 млн. м³ воды. Круглосуточную эксплуатацию комбината со всеми его производствами обеспечивали 3500 чел. Так создавалась в нашей стране новая, сложная, наукоемкая индустрия.

Чем же объяснить нашу гонку создания мощностей диффузионных заводов для получения значительных количеств второго вида ядерной взрывчатки — 90%-го ^{235}U ?

Как отмечалось в опубликованной в США в 1957 г. книге М. Каку и Д. Аксельрода «Выиграть ядерную войну: секретные военные планы Пентагона», сразу же после победы над Японией Комитетом начальников штабов США разрабатывались подробные планы атомной войны против СССР [24]. Кроме плана под кодовым названием «Пинчер» были и другие. Так, по директиве, утвержденной президентом США Трумэнном 23 ноября 1948 г., планировалось сбросить в 1952 г. атомные бомбы на 70 городов, включая Москву и Ленинград (план «Бушвейкер»). Эти планы в США непрерывно уточнялись. По очередному плану 1949 г. «Дропшот»^{*} предусматривалось сбросить в 1957 г. 300 атомных бомб на 200 городов СССР. В США

Рис. 16.
Соединение
в каскад
машин Т-56 на
диффузионном
заводе



^{*} Завершающий этап плана «Дропшот» предусматривал оккупацию СССР и других социалистических стран Европы путем вторжения с запада и юга 164 дивизий НАТО, в том числе 69 американских.

Таблица 19

Советские диффузионные машины

Тип	Расход газа, кг/с	Давление газа перед фильтрами, мм рт.ст.	Мощность электроприводов, кВт	Масса ступени, т	Удельная мощность для компрессоров, кВт/(кг·с)	Разделительная мощность, ЕРР/год
Однокомпрессорные с плоскими фильтрами						
ОК-6	0,008	14	0,5	0,2	62,5	0,13
ОК-7	0,030	19	1,5	0,7	50,0	0,57
ОК-8	0,090	19	4,0	1,2	44,4	1,7
ОК-9	0,240	19	10,0	2,5	41,7	3,6
ОК-19	0,030	19	1,2	0,66	40	0,6
Т-44	0,100	17	3,2	1,1	32	2,0
Т-45	0,350	20	14	3,5	40	9,1
Двухкомпрессорные (по схеме с подкачкой) с трубчатыми фильтрами						
Т-46	0,600	25*	13,5	6	22,5	18
Т-47	1,200	52	24,5	6	20,4	45
Т-49	2,200	55	44	10	20,0	75
ОК-23	4,000	49	60,4	11,5	15,1	140
ОК-26	8,000	97	116,3	12	14,5	300
Т-51	12,000	90	192	21,3	16	450
Т-52	14,000	105	209	20,7	14,9	500
ОК-30	14,000	190	198,1	13,5	14,2	500
Т-56	25,000	180	369	23	14,8	850

* Плоские пластинчатые пористые фильтры.

спешили изготавливать атомные бомбы из-за опасения, что СССР сможет догнать их в создании ядерного оружия [24].

Все это и объясняет интенсивное строительство у нас в стране в послевоенный период промышленных ядерных реакторов и диффузионных заводов для получения делящихся материалов и использования их в ядерном оружии. С 1949 по 1964 г. были построены и приняты в эксплуатацию еще 3 диффузионных завода по обогащению урана: в Томске-7 на Сибирском химическом комбинате, в Ангарске – Ангарский электролизный комбинат и в Красноярске-45 – Электрохимический завод [94]. Таким образом, промышленность по производству обогащенного урана была сосредоточена по стратегическим соображениям.

Центробежный и электромагнитный методы разделения изотопов

Одновременно с газодиффузионным методом велась разработка других технологий обогащенного урана – центрифужной и электромагнитной. В этих работах после 1945 г. принимали участие и немецкие ученые, работавшие в Сухуми (институты А и Г) [28, 84]. Под

руководством М. Арденне велись работы по электромагнитному методу. Профессор М. Штеенбек возглавлял работы по центрифужной технологии.

В начале 1951 г. на газодиффузионном заводе был начат серийный выпуск ^{235}U 90%-го обогащения. Все другие методы тогда находились на стадии лабораторных исследований, хотя электромагнитным методом уже 21 октября 1946 г. было осуществлено первое разделение изотопов урана.

Первые предложения по созданию центрифужного метода были сделаны немецкими учеными. Сначала немец-эмигрант Ф. Ланге работал в ХФТИ над горизонтальной высокооборотной центрифугой. В 1944 г. он был переведен в Свердловск в лабораторию электрических явлений. Несколько позднее над центрифугой для получения высокообогащенного урана работал в Синопе профессор М. Штеенбек, откуда 15 сентября 1951 г. работы были переведены на ЛКЗ. Вместе с М. Штеенбеком из Сухумского физико-технического института были переведены и его сотрудники. В Ленинграде М. Штеенбек работал с немецкими помощником Г. Циппе и другими, а также с несколькими советскими специалистами, включая начальника лаборатории инженера А.С. Вознюка, который также был переведен из Сухуми. В дальнейшем работы по центрифуге М. Штеенбека были прекращены, и он вместе с немецкими сотрудниками был переведен в Киев для работы по открытой тематике в АН УССР. В 1956 г. они были репатриированы в Германию.

Принцип работы газовой центрифуги по разделению изотопов урана заключается в том, что в цилиндрическом роторе центрифуги, заполненном UF_6 , при окружных скоростях >400 м/с в условиях вакуума более тяжелые молекулы концентрируются у стенки ротора и опускаются вниз. Разработка отечественной конструкции промышленной центрифуги постановлением правительства в 1952 г. была поручена ОКБ ЛКЗ. Вначале за основу конструкторских разработок была принята схема центрифуги, над которой работал М. Штеенбек. Как отмечает главный конструктор ОКБ Н.М. Синёв, в 1953 г. в ОКБ была доказана полная неотработанность сухумской конструкции центрифуги и бесперспективность ее для промышленного применения [28]. Из этой центрифуги в отечественную разработку был перенесен только узел опорной иглы, на которой вращается подобно «волчку» ротор. Это позволило решить сложнейшую проблему создания высокооборотных подшипников.

Основные принципы конструкции отечественной центрифуги и ее работы можно видеть из нижеприведенной схемы (рис. 17). В машине кроме узла опорной иглы особая роль отводится магнитной подвеске, обеспечивающей при высоких скоростях вращения ротора снятие нагрузки с опорной иглы. Быстровращающийся ротор центрифуги способен разделять молекулы газа по массам на легкие и тяжелые. Отдельно взятая газовая центрифуга имеет относительно небольшую разделитель-

ную способность. Идеальная теоретическая разделительная способность центрифуги пропорциональна квадрату разности молекулярных весов и четвертой степени линейной скорости вращения ротора [95]. Газонаполнение центрифуги мало. Она не нуждается в специальных компрессорах для перекачки газа по коммуникациям центробежного каскада. Необходимая для перекачки разность давлений получается внутри самой центрифуги благодаря газодинамическому напору на концах неподвижных отборных трубок. Этим же путем создается и внутренняя циркуляция газа в роторе. Основное же преимущество центрифужного метода по сравнению с диффузионным состоит в малой энергоемкости и существенно более высоком термодинамическом кпд. Энергоемкость центрифужной технологии в 10 раз ниже, чем газодиффузионной.

Центрифужная технология особенно эффективна для разделения изотопов средних и тяжелых элементов. Для этого в центрифуге необходимо иметь газообразные вещества. Для каждого разделяемого элемента синтезируется свое газообразное химическое соединение. Урановая центрифуга создана для работы на UF_6 . М. Штенбек вспоминал: «Моя работа над центрифугами закончилась в Ленинграде. Вместе с несколькими сотрудниками из Сухуми

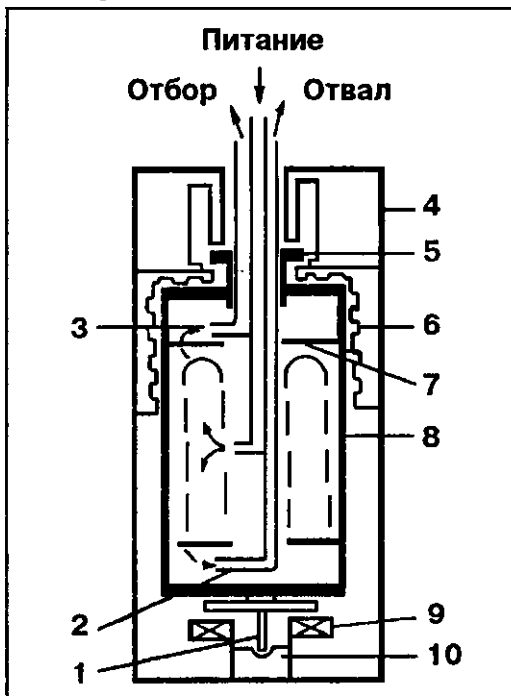


Рис. 17. Схема газовой центрифуги:

1 – игла; 2, 3 – нижний и верхний отборники соответственно; 4 – корпус; 5 – магнитная подвеска; 6 – молекулярный насос; 7 – диафрагма; 8 – ротор; 9 – статор; 10 – демпфер

я передал наш опыт группе поднагоревших в производстве физиков, математиков и конструкторов, которые вскоре, используя собственные идеи в области технического применения, оставили позади наши результаты. Как здесь пошли дальнейшие дела, мне неизвестно...» [28]. Однако известно, что сотрудник М. Штеенбека Г. Циппе, который, работая в ОКБ ЛКЗ, имел доступ ко всем работам по центрифугам, патентует в 1957 г. в 13 странах «центрифугу Циппе» – патент № 1071597. Фактически это была центрифуга, разработанная специалистами ОКБ*. Однако, узнав о частичном плагиате, наша страна ничего не предприняла, так как эти работы в СССР были секретными. Не желая делать достоянием гласности, что у нас в стране разработан более эффективный по сравнению с газодиффузионным центрифужный метод получения обогащенного урана, патент Циппе не был опротестован. Нашей стране удалось примерно в течение 30 лет скрывать наличие освоенного, наиболее прогрессивного и экономичного промышленного метода.

Основными разработчиками центрифужного метода у нас в стране были ЦКБМ, ОКБ ГАЗ, ВИАМ, Институт атомной энергии им. И.В. Курчатова и комбинат № 813, который сейчас называется Уральским электрохимическим комбинатом. Первый в мире промышленный завод, оснащенный газовыми центрифугами, был в 1960–1964 гг. построен и сдан в эксплуатацию в Свердловске-44 (поселок Верх-Нейвинский). Первые центрифужные опытные заводы за рубежом появились лишь 10 лет спустя. В течение 30 лет газоцентрифужной технологией были оснащены все 4 разделительных предприятия. Технологическое переоснащение осуществлялось, в основном, путем остановки газодиффузионного оборудования с размещением на высвобождающихся площадях газовых центрифуг. Параллельно проводилась замена отработавших ресурсный срок первых моделей газовых центрифуг на центрифуги, имеющие более высокие технико-экономические показатели [94].

Необходимо отметить, что переход, осуществленный в течение 1966–1972 гг., на газоцентрифужную технологию позволил увеличить разделительную мощность предприятий в 2,4 раза и сократить общее потребление электроэнергии в 8,2 раза. При этом новое строительство проводилось в минимальных размерах. За указанный период разработано 5 поколений газовых центрифуг. В последней модели удельное потребление электроэнергии на ЕРР в 25 раз меньше по сравнению с газодиффузионными машинами. Благодаря усилиям конструкторов и эксплуатационщиков

* Впоследствии ОКБ ЛКЗ стало называться Центральным конструкторским бюро машиностроения (ЦКБМ), а ОКБ ГМЗ – ОКБ ГАЗ, а затем – ОКБМ.

основное оборудование центрифужной технологии не требует проведения обслуживания и ремонтных работ в течение всего установленного ресурсного срока работы машин, который составляет $\geq 15\text{--}20$ лет.

Промышленная эксплуатация газодиффузионных заводов в нашей стране была прекращена в 1992 г. В настоящее время раздельные мощности предприятий, получающих обогащенный ^{235}U по газодиффузионной технологии, распределены следующим образом, % [94]:

Уральский электрохимический комбинат	49
Сибирский химический комбинат	14
Ангарский электролизный комбинат	8
Электролизный завод в Красноярске-45	29

В 1988 г. у нас в стране было принято решение о полном прекращении производства высокообогащенного урана для военных целей.

Ниже будут рассмотрены пути использования обогащательных мощностей предприятий России в интересах различных потребителей как у нас в стране, так и за рубежом.

Электромагнитный метод не нашел промышленного применения для получения обогащенного урана, но он широко применяется для разделения стабильных и радиоактивных изотопов. Этот метод основан на законах движения заряженных частиц в электрическом и магнитном полях. Здесь используется тот же принцип разделения по массам, что и в любом масс-спектрометре. Для получения значительных количеств изотопов применяются большие разделительные установки, работающие по принципу масс-спектрометра Демпстера* с фокусировкой и отклонением ионного пучка поперечным магнитным полем на 180° (рис. 18). В малых установках поворот ионного пучка осуществляется на 60° и 90° . Основные преимущества электромагнитного метода разделения изотопов по сравнению с молекулярно-кинетическими следующие:

- высокий коэффициент разделения в одном цикле;
- возможность одновременного обогащения всех изотопов разделяемого элемента в одной разделительной установке;
- универсальность, позволяющая применять одну и ту же установку для разделения стабильных и радиоактивных изотопов самых различных элементов;
- автономность отдельных разделительных установок;
- возможность разделения очень малых количеств вещества (мг).

* Канадский физик и химик. Работая в США, в 1918 г. построил первый масс-спектрометр, открыл ряд изотопов калия, лития и др. В 1935 г. открыл ^{235}U .

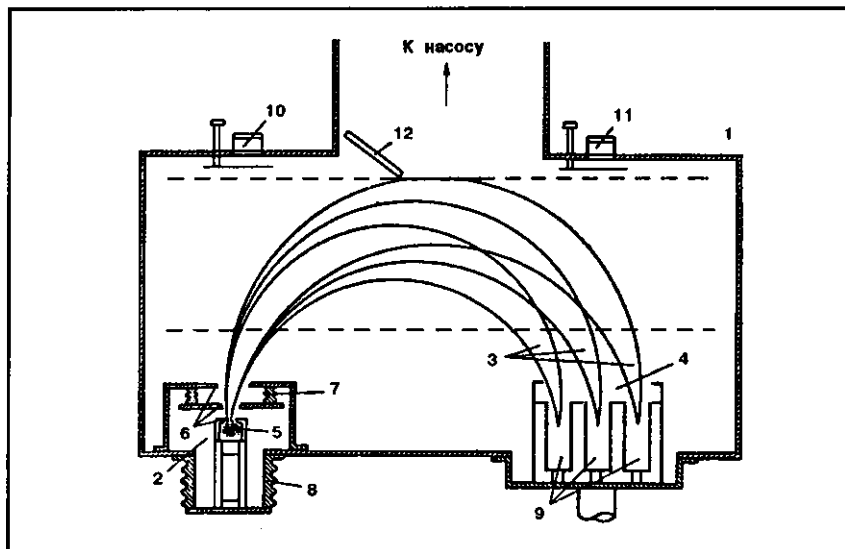


Рис. 18. Принципиальная схема установки для разделения изотопов электромагнитным методом:

1 — вакуумная камера; 2 — ионный источник; 3 — пучки ионов разделенных изотопов; 4 — приемник ионов; 5 — разрядная камера ионного источника; 6 — электроды ионно-оптической системы источника; 7, 8 — изоляторы; 9 — карманы приемника; 10, 11 — смотровые окна; 12 — диафрагма для защиты насоса от запыления компонентами рабочего вещества. Вакуумная камера откачивается до давления 10^{-3} мм рт.ст. мощными диффузионными насосами с общей скоростью откачки 20 тыс. л/с

К недостаткам электромагнитного метода относятся:

- малая производительность;
- малый коэффициент использования вещества в одном цикле разделения;
- наличие значительных безвозвратных потерь вещества;
- относительно большие энергетические и эксплуатационные затраты.

Электромагнитным методом в США впервые удалось получить значительные количества ^{235}U еще в военное время. В Ок-Ридже был построен большой завод, состоящий из нескольких независимых установок для электромагнитного разделения урана. В дальнейшем эти установки использовались для разделения изотопов других элементов. Чтобы одну и ту же установку с приблизительно постоянной траекторией ионов, т.е. имеющую фиксированное положение ионного источника и приемника (см. рис. 18), использовать для разделения изотопов легких и тяжелых элементов, необхо-

Рис. 19.
Электромагнит
сепаратора:
1 - кожух; 2 - разделительная камера;
3 - обмотка электромагнита;
4 - посадочные окна источников;
5 - посадочные окна приемников;
6 - диффузионные насосы;
7 - смотровые окна

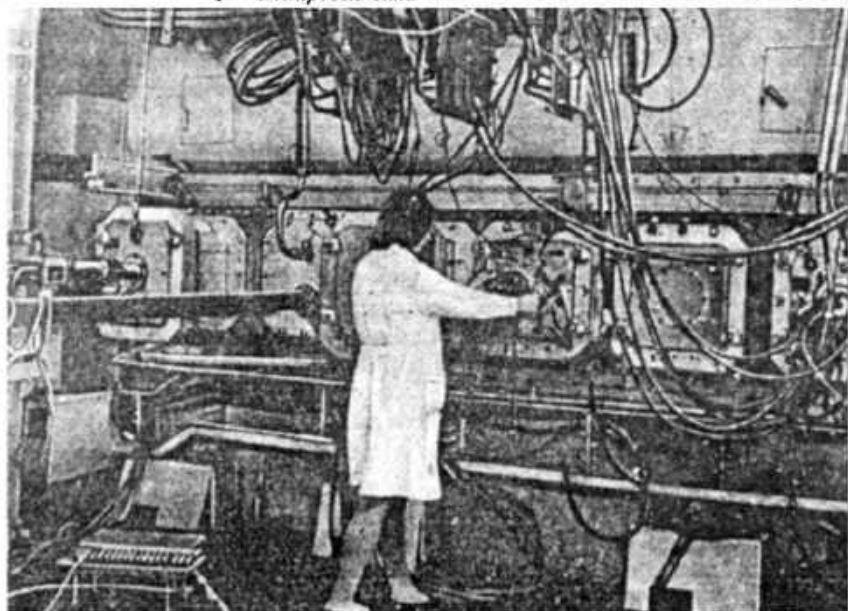
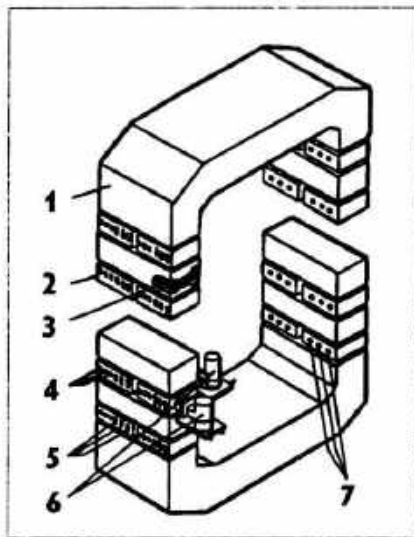


Рис. 20. Разделительная камера (вид спереди)

димо в несколько раз изменять напряженность магнитного поля^{*}. В нашей стране подобные установки были введены в эксплуатацию в Свердловске-45 (г. Лесной)^{**} для разделения в небольших количествах изотопов урана и других элементов. К настоящему времени электромагнитный метод разделения различных изотопов у нас в стране широко используется в основном для получения стабильных изотопов.

В книге Н.А. Кошечева и В.А. Дергачева «Электромагнитное разделение изотопов и изотопный анализ» [96] рассмотрены технологические процессы и физические основы получения 200 изотопов 44 химических элементов. Приведена конструкция сепаратора (установка СУ-20) и основные составляющие установки. Авторы отмечают: «... в однородных магнитных полях невозможно обеспечить хорошее разрешение ионных пучков для ионов со средней и тяжелой массой при больших углах расходимости. Это ставит под сомнение использование электромагнитного метода для получения изотопов в промышленных масштабах». В книге перечислены имена ученых и инженеров, внесших весомый вклад в развитие этого метода.

На рис. 19 приведена схема электромагнита сепаратора, а на рис. 20 — схема одной из 20 камер, на которой частично показаны условия ее обслуживания. Сложной конструкцией является источник получения ионов, к которому предъявляются следующие требования:

- обеспечить эффективное ионообразование;
- давать интенсивные ионные пучки заданной геометрии с минимальным разбросом скоростей ионов;
- иметь по возможности выгодный зарядовый состав ионов;
- располагать тепловыми возможностями, достаточными для получения паров различных элементов и их соединений.

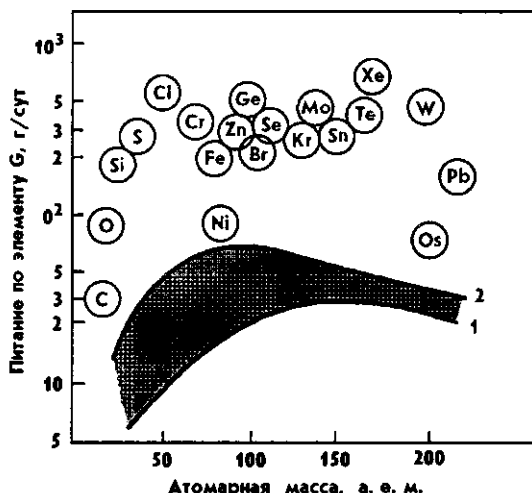
Особые требования предъявляются к приемнику ионов, его конструкции и извлечению ионов из приемных карманов. Технология извлечения изотопов из приемных карманов специфическая и требует индивидуальных подходов, кропотливой ручной работы, плохо поддающейся автоматизации. Сложными являются и методы аналитического контроля.

* Масса частиц, собираемых в приемнике изотопов, пропорциональна квадрату напряженности магнитного поля.

** Решение правительства о строительстве завода № 418 для электромагнитного разделения изотопов урана было принято в конце 1947 г. Первым директором был назначен Д.Е. Васильев. Главным проектантом завода был ГСПИ-11. Специальное оборудование разрабатывалось под руководством Д.В. Ефремова — заместителя министра электротехнической промышленности. Разработку и проектирование вакуумного оборудования вел Институт вакуумной техники под руководством С.А. Векшинского. Общее научное руководство осуществлял отдел ЛИПАНа (пачальник Л.А. Арцимович).

В Свердловске-45 практически одновременно с вводом в поселке Верх-Нейвинском первого газодиффузионного завода Д-1 была создана и введена в эксплуатацию крупная установка СУ-20 для электромагнитного разделения изотопов урана. Основное оборудование изготовлялось на ленинградском заводе «Электросила». Специальные магниты имели массу около 6 тыс. т. Монтаж магнитов осуществляли в вертикальном исполнении, а для их размещения было построено многоэтажное здание. На 5 этажах этого здания размещались 20 камер (по 4 на каждом этаже), в каждой из которых осуществлялся процесс разделения изотопов урана в соответствии со схемой, приведенной на рис. 19, 20. Институтом вакуумной техники было разработано необходимое оборудование, обеспечивающее в камерах высокий вакуум (10^{-6} мм рт. ст.). Надежная работоспособность камер обеспечивалась их жесткой конструкцией и материалом, из которого они были изготовлены. Этим материалом была латунь с толщиной стенок камер около 80 мм. Из-за больших размеров камер только одной латуни, используемой на установке СУ-20, было израсходовано около тысячи тонн. Регулярная работа установки требовала больших затрат электроэнергии. На этой установке длительное время получали изотопы многих химических элементов, расположенных в начале и конце таблицы Менделеева*. В то же время более молодой метод — центрифужный успешно использовали и для разделения стабильных изотопов [95, 96].

Рис. 21.
Сравнительная
производительность
по потоку питания
промышленной
электромагнитной ус-
тановки СУ-20 (1)
и центробежного
каскада-240 (2)



* На установке СУ-20 разделяют изотопы различных химических элементов для создания Государственного фонда изотопов.

Центрифужный метод разделения изотопов представляет большие возможности. Он позволяет разделять изотопы как легких (В, N, С, О, Кг, Cl), так и тяжелых элементов. Но одним из главных его достоинств является масштабность получения изотопов. Она без преувеличения открывает новую эру использования изотопов в технике, науке, медицине. По масштабам центрифужный метод разделения изотопов далеко превосходит электромагнитный (рис. 21). По всем приведенным на рис. 21 изотопам центрифужный каскад имеет производительность в десятки раз выше, чем электромагнитная установка. В настоящее время изотопы Ge, Ст, Zn, W получены в количестве десятков и более килограммов. Центрифужный метод, несмотря на относительную его молодость, дает основное количество изотопной продукции. И конечно, следует отметить меньшую стоимость изотопов, полученных в центрифугах. Однако урановая центрифуга, созданная для работы на UF_6 , не может быть эффективно использована для разделения стабильных изотопов других элементов. Для указанных изотопов были разработаны центрифуги с индивидуальными свойствами. Кроме того, вещество, заполняющее центрифугу, не должно вызывать коррозию конструкционных материалов. Перечень этих веществ ограничен.

Главные потребители обогащенного ^{235}U

Из полученных на первом диффузионном заводе в 1949–1950 гг. первых килограммов ^{235}U 90%-го обогащения была изготовлена первая урановая бомба, взорванная на Семипалатинском полигоне 18 октября 1951 г. [84]. Это произошло через 2 года после взрыва первой в СССР плутониевой бомбы. С самого начала производство комбината было ориентировано на одного потребителя высокообогащенного урана – Министерство обороны [97]. Поэтому после получения высокообогащенного урана из UF_6 получали металлический ^{235}U и по ранее рассмотренной схеме, как и из плутония, можно было изготавливать детали зарядов атомных бомб. С начала 1951 г. газодиффузионный завод мог производить примерно 1 кг высокообогащенного урана в день [84]. К этому времени на других предприятиях ПГУ (на заводе № 12 и в НИИ-9) была отработана технология получения изделий из металлического урана при изготовлении урановых блоков для загрузки первого ядерного уран-графитового реактора, работавшего с 1948 г. в Челябинске-40 (комбинат № 817). Были изучены свойства металлического урана и плутония, отработана технология и введены в эксплуатацию соответствующие производства на заводе В комбината № 817 для получения деталей атомных бомб как из металлического плутония, так и из металлического урана 90%-го обогащения по ^{235}U .

По уже известной схеме плутониевой бомбы создавалась и урановая бомба. Главные исполнители: комбинаты № 813 и 817, завод № 12, КБ-11 и соответствующие заводы, а также ЛИПАН, НИИ-9, НИИ-10 и заводы по получению UF_6 — участвовали в создании ядерного оружия на основе ^{235}U . При этом учитывалось, что в отличие от плутония минимальная критическая масса металлического высокообогащенного урана (плотность $18,8 \text{ г/см}^3$) существенно выше, чем у металлического плутония с плотностью $19,6 \text{ г/см}^3$.

Поэтому урановый ядерный заряд был больших размеров, чем плутониевый. Однако уже с начала 50-х гг. для ^{235}U , в отличие от ^{239}Pu , кроме Министерства обороны появились и другие потребители. Так, лаборатория В, на базе которой был образован ФЭИ, еще до пуска завода Д-1 получила задание разработать на слабообогащенном ^{235}U ядерный реактор для первой в СССР АЭС² [98, 99].

Уже в 1949 г. были приняты решения создавать исследовательские и опытно-промышленные реакторы, использующие в твэлах, загружаемых в активную зону реактора, обогащенный ^{235}U . В этих реакторах плотность потока тепловых нейтронов должна быть выше, чем в работающем на природном уране первом промышленном реакторе комбината № 817. Такие реакторы на уране 2%-го обогащения и выше работали уже в 1951–1952 гг.

Для наработки трития в ядерных реакторах (основного изотопа, необходимого для создания эффективного термоядерного оружия) тоже нужен обогащенный уран. Такой реактор (АИ на комбинате № 817) был пущен 22 декабря 1951 г. с использованием в качестве ядерного горючего блоков урана 2%-го обогащения [98]. Еще в 1949 г. И.В. Курчатов писал: «Для успешного проектирования атомных реакторов высокой интенсивности требуется решение технически весьма сложного вопроса — создание тепловыделяющих элементов реактора РФТ» [98]. В этом физическом реакторе на тепловых нейтронах, ставшем с апреля 1952 г. основной ядерно-физической экспериментальной базой ЛИПАНа, твэлы из слабообогащенного урана имели сложную конструкцию. Под действием облучения нейтронами в реакторе они изменяли форму и размеры. Усилия, предпринятые учеными, обеспечили создание специальных диспергированных твэлов методом горячего прессования порошка урана и магния³, которые не изменяли свои размеры в реакторах.

² Для сферы из металлического урана с обогащением 93,5%, окруженной металлическим урановым отражателем толщиной 10 см, минимальная критическая масса составляет около 16,5 кг вместо примерно 6 кг для металлического плутония [100].

³ Была пущена 27 июня 1954 г. (тепловая мощность реактора 30 МВт).

³ Эта технология на заводе № 12 была разработана под руководством ученых ВИАМа Р.С. Амбарцумяна и А.М. Глухова.

База исследовательских реакторов создавалась не только в ЛИПАНе, но и в других центрах России, Украины, Белоруссии и других республик. В период 1955–1958 гг. по предложению И.В. Курчатова были приняты решения о строительстве 20 исследовательских реакторов в Советском Союзе и ряде зарубежных стран. Во всех этих реакторах ядерным топливом был обогащенный ^{235}U . В атомных ледоколах и ядерных реакторах для ВМФ в качестве горючего в твэлах также использовали обогащенный уран. Как отмечают специалисты, наши подводники не раз достигали Северного полюса, а группа атомных подводных лодок совершила беспрецедентное в истории плавание вокруг света без всплытия на поверхность [101].

С конца 50-х гг. одним из потребителей обогащенного ^{235}U становятся АЭС. Ядерное топливо, изготовленное из обогащенного урана, поставляется на АЭС ряда зарубежных стран. В странах бывшего СССР доля электроэнергии, вырабатываемой на АЭС на 1 января 1993 г., составила, %: Литва – 78,2, Украина – 29,4, Россия – 11,8.

Усилия, затраченные в послевоенный период на получение высокообогащенного ^{235}U для ядерного оружия, позволили нашей стране не только мирно жить, но и создать промышленность по получению ядерного горючего для нужд народного хозяйства. В связи с решением, принятым в 1988 г. о полном прекращении производства высокообогащенного урана, появились избыточные мощности заводов по разделению изотопов урана. Они позволяют экспортировать обогащенный уран и полностью обеспечивать (до 2005 г.) им нужды отечественной ядерной энергетики.

Громадные усилия всех участников получения обогащенного урана не пропали даром.



О первых в нашей стране ядерных реакторах с тяжелой водой

Первым увидел возможность создания ядерного реактора на природном уране с тяжелой водой в качестве замедлителя нейтронов крупнейший французский ученый Ф. Жолио-Кюри. Он проводил опыты на уране с относительно большим количеством тяжелой воды. Тогда мировой запас D_2O составлял 180 кг и вся она была во Франции, где Ф. Жолио-Кюри в 1939–1940 гг. вместе с Х. Халбаном и Л. Коварски начали работы по сооружению ядерного реактора с тяжелой водой.

В нашей стране, как писал И.В. Курчатов в 1943 г. [102], считалось доказанным, что на природном уране невозможно осуществить цепную ядерную реакцию в системе уран– D_2O . Полагали, что для работы реактора нужен уран, обогащенный изотопом ^{235}U . Этот вывод основывался на расчетах профессоров Ю.Б. Харитона и Я.Б. Зельдовича, показавших, что для развития цепи в смеси уран–тяжелая вода необходимо, чтобы поперечное сечение захвата тепловых нейтронов ядрами тяжелого водорода было $\leq 3 \cdot 10^{-27}$ см². Сечение захвата нейтронов физики в нашей стране не могли измерить: отсутствовала техническая база и не было в достаточных количествах тяжелой воды. Поэтому пользовались экспериментальными значениями этой величины, полученными американскими учеными. Их измерения показали, что это сечение более чем в 3 раза выше предельного значения, на которое указывали в своих расчетах Ю.Б. Харитон и Я.Б. Зельдович. Таким образом ученые пришли к заключению, что осуществление реакции в смеси природный уран–тяжелая вода невозможно [102]. «Вывод наших ученых, — писал И.В. Курчатов, — оказался ошибочным». Анализируя полученные нашей разведкой материалы о проводимых в Великобритании и США работах по атомной программе, И.В. Курчатов пришел к выводу, отличному от вывода Ю.Б. Харитона и Я.Б. Зельдовича.

В его докладе Совнаркому говорилось: «Халбан и Коварски пришли к противоположному выводу, имеющему, конечно, громадное принципиальное значение. Халбан и Коварски получили, согласно данным материала, образование 1,05–1,06 вторичного нейтрона на один первичный нейтрон, т.е. осуществили условия развивающегося цепного процесса» [102].

Свои эксперименты французские ученые продолжили в Великобритании в 1940 г. Во Франции же еще в 1939 г., имея достаточный запас тяжелой воды*, ими были экспериментально определены те поперечные сечения захвата тепловых нейтронов ядрами тяжелого водорода, которые невозможно было определить у нас.

В 1943 г. работы в лаборатории № 2 только разворачивались, поэтому данные нашей разведки представляли большую ценность и детально анализировались лично И.В. Курчатовым по поручению заместителя председателя Совнаркома СССР М.Г. Первухина. На интенсивность работы в этом направлении указывает тот факт, что в записке И.В. Курчатова от 3 июля 1943 г. (документ № 6 из архива внешней разведки России [102]) им было проанализировано 237 американских публикаций, в том числе:

- 29 работ, посвященных разделению изотопов урана методом диффузии, который, по оценкам И.В. Курчатова, был основным в США;
- 18 работ по методам разделения изотопов с помощью центрифуг;
- 32 работы, относящиеся к проблеме смеси уран–тяжелая вода;
- 29 работ по уран–графитовому реактору;
- 55 материалов по химии урана, в которых были данные по получению чистого металлического урана и его оксида, получению UF_6 , удобного для разделения изотопов урана диффузионным методом, металлоорганических соединений урана и т.д.;
- 10 работ по созданию бомбы из ^{235}U ;
- 14 материалов по проблемам плутония и нептуния.

Поступали материалы через разведку и по другим направлениям деятельности, их анализировали и давали рекомендации по особо интересующим нашу страну проблемам в области создания ядерного оружия [103].

В связи с оккупацией Франции исследования по созданию реактора на природном уране с тяжелой водой были прекращены, а документация и запас тяжелой воды были вывезены в Великобританию. Исследовательская группа французских физиков (Х. Халбан, Л. Коварски) продемонстрировала в Кембридже возможность достижения цепной реакции с помощью урана в тяжелой

* В нашей стране запас тяжелой воды составлял лишь 2 кг [102].

воде. С учетом работ других ученых в 1940 г. в Великобритании был создан Комитет по руководству атомным проектом во главе с Дж.П. Томсоном.

Во время войны немецкие ученые под руководством В. Гейзенберга тоже вели работы по созданию реактора и делали отчаянные попытки вывести тяжелую воду из Норвегии [104]. В Норвегии с 1934 г. фирма Norsk-Hydro впервые в мире начала производить тяжелую воду в промышленном масштабе по электролизной технологии, разработанной двумя химиками — профессором Л. Тренстадом и инженером И. Бруном. В Германию тяжелая вода начала поступать после захвата Норвегии. Фирма Norsk-Hydro получила заказ от немецкого концерна Farbenindustri в конце 1940 г. До конца 1941 г. заказ на поставку составлял 1000 кг, а в 1942 г. — 1500 кг D_2O . Однако получить достаточное для создания ядерного реактора количество D_2O немцы не смогли, так как завод по производству тяжелой воды в Норвегии был взорван специально подготовленными в Великобритании диверсионными группами. К ноябрю 1941 г. Германия получила только 500 кг тяжелой воды. Немцы восстановили завод, и к 1944 г. было получено уже около 15 т D_2O , но ее не успели доставить в Германию [104]. После войны во Франции в 1948 г. под руководством Ф. Жолио-Кюри был осуществлен запуск экспериментального ядерного реактора на тяжелой воде. Однако самый первый исследовательский реактор на металлическом уране природного обогащения с тяжелой водой в качестве замедлителя нейтронов был пущен в США в 1944 г. [105]. Критическая масса составила 3 т металлического урана, а количество тяжелой воды — 6,5 т. Тепловая мощность первого тяжеловодного реактора — 300 кВт, средняя плотность потока тепловых нейтронов — $5 \cdot 10^{11} \text{ с}^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$. Если сравнить эти данные с полученными в первом уран-графитовом реакторе, пущенном в Чикаго (46 т), то можно увидеть, что в тяжеловодном опытном реакторе используется примерно в 15 раз меньше урана. Количество же тяжелой воды, необходимое для осуществления цепной реакции, требуется в 60 с лишним раз меньше, чем количество сверхчистого графита. Любая возможность сэкономить ядерные материалы в то время для нашей страны была очень важна. Ведь даже своего природного урана еще не было, не говоря о сложнейшей технологии его обогащения.

Данные о реакторах США, построенных на природном уране, привели к переоценке приоритетных работ в лаборатории № 2. Наряду с продолжением исследований по обогащению ^{235}U и созданию из него атомной бомбы была поставлена задача построить реактор, работающий на природном уране для получения нового делящегося материала — плутония. Для реализации управляемой

цепной ядерной реакции в реакторах на природном уране в качестве замедлителя нейтронов следовало использовать графит или тяжелую воду.

В 1947 г. в США был создан второй исследовательский реактор на тяжелой воде [105]. Загрузка металлического урана природного обогащения составляла 10 т, а количество D_2O в активной зоне — 17 т. Мощность этого более совершенного реактора равнялась 30 МВт, а средний поток нейтронов — $2 \cdot 10^{13} \text{ с}^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$.

В нашей стране разработка и создание тяжеловодных реакторов осуществлялись под научным руководством А.И. Алиханова. Он, как и И.В. Курчатов, перед войной работал в ЛФТИ и с 14 августа 1943 г. вместе с ним, а также с В.П. Джелеповым, Л.М. Неменовым, Г.Н. Флёровым, М.С. Козодаевым и другими учеными был переведен в лабораторию № 2.

В лаборатории № 2 в 1943–1945 гг. исследовались 3 реакторные концепции:

- И.В. Курчатов, И.С. Панасюк возглавляли работы по созданию уран-графитового реактора (водографитовый реактор);
- Г.Н. Флёров, В.А. Давиденко изучали возможность осуществления цепной ядерной реакции в реакторах на уране с обычной водой (водо-водяной реактор);
- А.И. Алиханов, С.Я. Никитин вели исследования по тяжеловодному реактору.

В сентябре 1945 г. на первом заседании Технического совета Специального комитета были заслушаны отчеты И.В. Курчатова, Г.Н. Флёрова и А.И. Алиханова по 3 типам ядерных реакторов. Перспективными были признаны уран-графитовые и тяжеловодные реакторы. Основными материалами для этих типов реакторов кроме металлического урана природного обогащения были графит ядерной чистоты и тяжелая вода. Природное соотношение тяжелой и легкой воды составляет 1:6800. Выделение тяжелой воды из природной — задача технически очень сложная. Над проблемой получения графита в промышленности в лаборатории № 2 работали В.В. Гончаров и Н.Ф. Правдюк. Физико-химические исследования по созданию промышленных методов получения D_2O вели А.И. Алиханов, Р.Л. Сердюк, Д.М. Самойлович. Кроме того, в лаборатории № 2 было создано специальное подразделение — сектор № 4, в котором разрабатывались различные технологии получения D_2O . Сектор возглавлял М.И. Корнфельд. В институтах Наркомхимпрома и Академии наук были созданы лаборатории по разработке методов получения D_2O . К этой проблеме был подключен и НИИ-9, где работали немецкие ученые М. Фольмер и Р. Доппель.

Создание лаборатории № 3 АН СССР

Лаборатория № 3 была создана по инициативе Технического совета Специального комитета. В совет тогда входили Б.Л. Ванников, А.И. Алиханов, П.Л. Капица, И.В. Курчатов, В.А. Махнёв (секретарь Специального комитета), Ю.Б. Харитон, В.Г. Хлопин и др. В решении Технического совета от 8 октября 1945 г., подписанном председателем Совета Б.Л. Ванниковым и ученым секретарем А.И. Алихановым, было записано: «Считать необходимым организовать под руководством А.И. Алиханова лабораторию № 3 АН СССР, возложив на нее следующие задачи:

- физические исследования, проектирование и осуществление ядерного котла уран–тяжелая вода;
- физические исследования систем торий–вода, торий–плутоний–вода для получения ^{233}U ;
- физические исследования β -радиоактивности;
- физические исследования ядерных частиц большой энергии и космических лучей.

Представить на рассмотрение Специального комитета внесенный тт. Мешиком П.Я. и Алихановым А.И. проект постановления СНК СССР по данному вопросу».

Одновременно Технический совет по предложению комиссии в составе М.Г. Первухина (председатель), А.Г. Касаткина, Н.А. Борисова, А.И. Алиханова, М.И. Корнфельда, В.А. Каргина*, Л.С. Генина поручил разработать эскизные проекты сооружения промышленных установок по получению тяжелой воды по следующим методам:

- дистилляции;
- изотопного обмена с сероводородом, совмещенным с дистилляцией;
- изотопного двухтемпературного обмена между водяным паром, водой и водородом;
- изотопного обмена с сероводородом.

Разработка проекта установки по изотопному сероводородному обмену, совмещенному с дистилляцией, поручалась Государственному союзному НИИ-42 Наркомхимпрома, предложившему этот метод. По остальным методам разработка эскизных проектов установок возлагалась на созданную для этих целей группу специалистов во главе с М.И. Корнфельдом.

Постановлением правительства от 1 декабря 1945 г. организационно была сформирована лаборатория № 3, руководителем которой был

* В.А. Каргин (1907–1969) – химик, академик с 1953 г. С 1930 г. работал в Научно-исследовательском физико-химическом институте им. Л.Я. Карпова.



**АБРАМ ИСААКОВИЧ
АЛИХАНОВ**
(1904–1970) —
академик с 1943 г.

Под его
руководством
(совместно
с В.В. Владимирским)
создавались
промышленные
тяжеловодные
реакторы
и протонные
ускорители
на 7 ГэВ (в ИТЭФ) и
на 70 ГэВ
в г. Серпухове

назначен А.И. Алиханов, а его заместителем (с 1946 г.) — В.В. Владимирский, до настоящего времени работающий в ИТЭФ. В состав лаборатории № 3 были переведены часть сотрудников из лаборатории № 2 и других институтов. После создания НИИ-9 и лаборатории № 2 третьей самостоятельной исследовательской организацией, полностью работающей по тематике ПГУ, становится лаборатория № 3.

Еще до создания лаборатории № 3 решением ГКО от 4 сентября 1945 г. Наркомхимпрому было поручено организовать производство тяжелой воды, или продукта № 180, как она тогда называлась из режимных соображений. Совместным приказом ПГУ и Наркомхимпрома было развернуто проектирование и строительство установки и цеха по производству D_2O .

Для усиления исследовательских работ по получению D_2O постановлением правительства от 18 марта 1946 г. НИИ-9 было поручено организовать лабораторию, которой установили сверхжесткие сроки проведения работ. Контроль за обеспечением работ по получению D_2O был возложен лично на министров М.Г. Первухина (Химпром), Н.А. Борисова (Госплан), П.И. Паршина (Химмаш) и И.Г. Кабанова — министра электротехнической промышленности (за изготовление электролизеров и необходимого оборудования). Министрам каждые 2 мес предстояло докладывать правительству о ходе работ.

Для лаборатории № 3 в Москве в районе Черемушек была выделена территория (около 100 га) в усадьбе Меньшиковых. В 1947 г. в штате лаборатории № 3 находилось 300 сотрудников. Приказом по ПГУ от 26 марта 1946 г. в утвержденном правительст-

вом Титульном списке на строительство лаборатории № 3 выделяется на 1946 г. 2 млн. руб. Сразу же под руководством А.И. Алиханова составляются технические задания на разработку проекта опытного реактора с использованием в качестве замедлителя нейтронов тяжелой воды. Указанным выше постановлением правительства от 18 марта 1946 г. отличившимся строителям, рабочим и ИТР, создающим технологию получения тяжелой воды, строящим соответствующие цеха и изготавливающим оборудование, устанавливалась аккордная оплата. Отличившихся рабочих, инженеров и ученых предлагалось представлять к правительственным наградам. Такое исключительное внимание к созданию производств получения тяжелой воды и соответствующих ядерных реакторов в тот период можно объяснить лишь тем, что тяжеловодные реакторы для своей работы требуют в 10–15 раз меньшую исходную загрузку урана. Добыча же природного урана в стране только организовывалась, а его запасы были мало изучены. Для загрузки опытного реактора Ф-1 (лаборатория № 2) и частично промышленного реактора А (комбинат № 817) использовалась урановая руда, завезенная в 1945 г. из Германии [106].

В лаборатории № 3 начинает создаваться экспериментальная база. В 1948 г. было построено главное здание и пущен циклотрон — ускоритель дейтронов с энергией до 12 МэВ. Начинаются интенсивные экспериментальные и теоретические работы в обеспечение строительства первых в стране исследовательского и промышленного тяжеловодных реакторов на природном уране.

С самого начала основными направлениями исследований лаборатории № 3 по тяжеловодным реакторам были:



**ВАСИЛИЙ
ВАСИЛЬЕВИЧ
ВЛАДИМИРСКИЙ** –
заместитель
директора ИТЭФ
с 1946 г., главный
редактор журнала
«Ядерная физика»,
член-корреспондент
АН СССР с 1962 г.

- теория ядерных реакторов;
- экспериментальное получение необходимых физических констант для расчета реакторов;
- физико-теплотехнические исследования;
- выгорание ядерного топлива, накопление в нем нептуния, изотопов плутония и трансплутониевых элементов;
- оптимизация физических характеристик реактора;
- проблемы надежного регулирования мощности реактора и управления ею.

Особое внимание уделялось исследованию радиационной стойкости тяжелой воды и конструкционных материалов. Первоочередной задачей лаборатории было создание экспериментальной базы для проведения нейтронно-физических исследований.

Как отмечал ветеран лаборатории № 3, крупнейший специалист по расчетам ядерных реакторов на тепловых нейтронах А.П. Рудик, теория реакторов создавалась под руководством И.Я. Померанчука, который с 1943 по 1945 г. работал в лаборатории № 2.

Под руководством И.Я. Померанчука с самого начала работали известные физики-теоретики В.Б. Берестецкий и А.Д. Галагин, а внештатным сотрудником был профессор Л.Д. Ландау. К разработке теории реакторов А.И. Алихановым и И.Я. Померанчуком привлекались из других институтов крупнейшие физики-теоретики А.И. Ахиезер, И.И. Гуревич, А.Б. Мигдал, И.Е. Тамм и др.* По словам А.П. Рудика, к концу 40-х гг. была создана последовательная теория ядерных реакторов, включающая такие вопросы, как замедление нейтронов, резонансное поглощение нейтронов, гетерогенная теория реакторов, размножение на быстрых нейтронах, проблемы регулирования реакторов с учетом запаздывающих нейтронов и др. Эти проблемы позднее были освещены в работе [107] и других публикациях.

Многие расчеты реакторов и экспериментальные работы на нейтронных спектрометрах и ускорителях проводились под руководством заместителя директора лаборатории № 3 В.В. Владимирского. Радиохимические работы с тяжелой водой проводили Б.В. Эршлер, Л.Я. Суворов, Р.Л. Сердюк.

Одновременно формировались научные коллективы и технический персонал по всем направлениям деятельности, определенным решением Технического совета Специального комитета.

* А.И. Ахиезер с 1937 г. — руководитель теоретического отдела в ХФТИ, с 1964 г. — академик АН УССР; академик И.Е. Тамм — руководитель теоретического отдела в ФИАНе, лауреат Нобелевской премии.

О некоторых свойствах тяжелого водорода и получении D₂O

Как известно, в 1932 г. был открыт стабильный изотоп с массовым числом, в 2 раза большим, чем протий (¹H). Тяжелый изотоп называли дейтерием — D (²H)*. Из-за большой относительной разницы в массах ²H и ¹H различия в свойствах изотопов водорода выражены значительно сильнее, чем у изотопов других элементов.

Два изотопа водорода дают три изотопные формы молекулярного водорода, свойства которых различаются (табл. 20). Сильно отличаются и химические свойства соединений дейтерия и протия. В 5 раз медленнее протекает его взаимодействие с бромом (с получением бромистого водорода). Электролитическое разложение тяжелой воды протекает медленнее в 3–18 раз. В то же время некоторые реакции идут быстрее. Так, синтез аммиака в присутствии паров ртути идет в 10 раз быстрее [109].

Таблица 20

Изменение физических свойств молекулярного водорода [109]

Физические свойства	H ₂	HD	D ₂
Критическая температура, К	33,24	35,9	38,26
Температура кипения, К	20,39	22,13	23,57
Температура плавления в тройной точке, К	13,96	16,60	18,72
Давление насыщенного пара при 22 К, атм	1,52	0,893	0,621
Теплота испарения при P=194,5 мм рт. ст., кал/моль	219,7	263,0	302,3
Теплота сублимации, кал/моль	183,4	228	274,0

Основным источником научно-технической информации в те годы были материалы разведки. И.В. Курчатов упоминает, что среди документов, полученных через разведку, наряду с материалами по ²³⁵U и ²³⁹Pu были и относящиеся к производству тяжелой воды [102]: 6 материалов по ректификации, 4 — по электролизу, 5 — по общим вопросам разделения изотопов. Хотя в анализе и сделан основной вывод, что ядерный реактор в первую очередь должен создаваться с графитовым замедлителем, тяжеловодный реактор был более привлекателен, так как для него вместо 50 т требовалось всего 1–2 т урана.

В настоящее время методы получения D₂O детально рассмотрены в учебниках для вузов и известных монографиях [108,110]. Практическое применение нашли методы, основанные на реакциях изотопного обмена. В равновесных условиях изотопы водорода концентрируются

* Публикация, в которой приведены экспериментальные доказательства существования стабильного тяжелого изотопа, была сделана в 1932 г. Юри, Бриквелде и Мерфи. Третий — T(³H) был открыт Резерфордом, Олифантом и Хартеком в 1934 г. [108].

в разных соединениях по-разному. Однако разность концентраций при однократном уравнивании исчезающе мала. Для получения концентрированного тяжелого водорода однократный изотопный эффект умножают в противоточных колоннах в тысячи и десятки тысяч раз. При химическом обменном разделении изотопов водорода обращение потоков (перевод водорода из одной формы в другую) осуществляется химическим, электрохимическим или термическим способом. Последний способ используется и в процессах разделения, основанных на изотопных эффектах при фазовых равновесиях [108]. В результате изотопного обмена дейтерий распределяется между водородсодержащими веществами неравномерно. Различием физических и химических свойств соединений дейтерия и протия пользуются для выделения дейтерия. Основными методами его выделения являются:

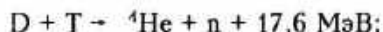
- двухтемпературный изотопный обмен воды с сероводородом, основанный на различии равновесного распределения дейтерия между водой и сероводородом при разных температурах;
- низкотемпературная ректификация жидкого водорода;
- электролиз воды для получения кроме основных продуктов (водорода и кислорода) побочного продукта – D_2O ;
- ректификация дейтерийсодержащих соединений (вода, аммиак).

В конце 1945 г. побочный продукт D_2O при электролизе воды становится основным. В течение 1946–1947 гг. у нас в стране под руководством Специального комитета и ПГУ работами по получению D_2O занимались все, кого можно было привлечь, включая и немецких ученых. Так, на заседании НТС ПГУ от 22 августа 1946 г. докладчиком по изотопному обмену воды с аммиаком был профессор М. Фольмер. В решении НТС НИИ-9 было поручено определить коэффициенты разделения для равновесной изотопной газовой смеси аммиака и коэффициент распределения дейтерия между парами аммиака и водно-аммиачной смесью. В решении Технического совета от 29 октября 1945 г. руководителям ПГУ, Химпрома и Госплана поручалось подготовить постановление Совнаркома по обеспечению производства D_2O на Чирчикском электрохимическом комбинате и Московском электролизном заводе, а также по выбору других районов строительства новых заводов для получения D_2O .

До выхода постановления Совнаркома приказом наркома химической промышленности от 19 октября 1945 г. начальнику Главзота и директору Чирчикского комбината поручалось на установке № 470 в четвертом квартале 1945 г. начать наработку D_2O с концентрацией 1,5–2,0%. Электрохимическому комбинату было установлено выпустить в октябре 6,75, ноябре 25, декабре 40 кг в пересчете на чистый D_2O . На первый квартал 1946 г. устанавливалось задание примерно 150 кг, а за весь год нужно было получить 1800 кг D_2O . Были намечены места строительства других заводов для получения D_2O .

Кроме Технического совета проблемы получения D_2O и изучения его свойств еженедельно рассматривались на секции № 4 Инженерно-технического совета. Руководителем этой секции был А.Г. Касаткин. Впоследствии секцию возглавил В.С. Емельянов. При Специальном комитете была создана еще и комиссия под руководством М.Г. Первухина, в которую входили А.Г. Касаткин, П.Л. Капица, М.И. Корнфельд.

Физические свойства дейтерия были и остаются идеальными для использования как в ядерных реакторах, так и в термоядерном оружии. Тяжелая вода, или оксид дейтерия, нашла широкое применение в качестве замедлителя нейтронов в ядерных реакторах. По эффективной замедляющей способности D_2O в 170 раз превосходит обычную воду, в 75 — бериллий, в 70 раз — графит [109]. Дейтерий — один из главных материалов, используемых в термоядерном оружии. Широко известны его реакции с тритием и 6Li :



Ядра дейтерия, или дейтроны (дейтоны), используются физиками в виде пучка ускоренных частиц при изучении различных ядерных реакций.

Тяжелая вода получила свое название из-за повышенной плотности по сравнению с обыкновенной водой. Впервые тяжелая вода была получена Г. Льюисом и Р. Макдональдом (США) в 1933 г. из природной воды. В СССР D_2O была получена в 1934 г. известным физикохимиком А.И. Бродским. В природных водах и атмосферных осадках в ничтожных количествах содержится как D_2O , так и HDO . При температуре $25^\circ C$ плотность D_2O выше, чем в обычной воде, на 10,8%, а вязкость — примерно на 25%. В тяжелой воде замедлены биологические процессы в живых организмах (табл. 21).

Таблица 21

Сравнение физических свойств обычной и тяжелой воды [109]

Физические свойства	D_2O	H_2O
Молекулярный вес	20,02948	18,01625
Плотность при $25^\circ C$, г/см ³	1,10421	0,99678
Температура кипения, $^\circ C$	101,43	100
Температура плавления при давлении 1 атм, $^\circ C$	3,813	0
Давление пара, мм рт. ст.	20,05	23,75
Относительная вязкость при $25^\circ C$	1,232	1,000
Теплоемкость при $25^\circ C$, кал/(моль $\cdot^\circ C$)	20,25	18,17
Теплота испарения при $25^\circ C$, ккал/моль	10,85	10,52



**НИКОЛАЙ
МИХАЙЛОВИЧ
ЖАВОРОНКОВ**
(1907–1990) —
директор
Научно-иссле-
довательского
физико-химического
института
им. Л.Я. Карпова
с 1946 по 1948 г.
С 1962 г. академик,
директор Института
общей
и неорганической
химии АН СССР,
секретарь-академик
Отделения
физикохимии
и технологии
неорганических
материалов

Решением НТС ПГУ от 11 ноября 1946 г. институтам были даны задания на разработку технических условий и методик анализа D_2O , в частности Научно-исследовательскому физико-химическому институту им. Л.Я. Карпова и лаборатории № 3. Директора институтов, ответственные за технологию получения D_2O , регулярно отчитывались на НТС ПГУ. Так, в 1946 г. были заслушаны:

12 августа — директор ЛФТИ А.И. Иоффе;

23 сентября — директор ИФП А.П. Александров;

26 сентября — директор Научно-исследовательского физико-химического института им. Л.Я. Карпова Н.М. Жаворонков.

Контроль за работой лабораторий, институтов и предприятий над Урановым проектом был в те годы особенно жестким. В первую очередь его осуществляли Технический и Инженерно-технический советы Специального комитета. Как правило, заседания проходили еженедельно, а время их работы с заслушиванием разработчиков и изготовителей приходилось нередко на самые поздние часы. Это практиковалось позднее и при работе НТС ПГУ.

17 июня 1946 г. в 22 часа на НТС был заслушан А.Г. Касаткин о выполнении решений и мероприятий по производству тяжелой воды. Анализируя работу опытной установки на Чирчикском электрохимическом комбинате, докладчик отметил, что будет достаточно 10–11 ступеней электролиза, чтобы увеличить концентрацию D_2O с 1,5 до 99,6%. Одним из основных методов получения D_2O в те годы был электролитический. При электролизе воды тяжелая вода разлагается в несколько раз медленнее, чем легкая. Поэтому в электролите по мере его разложения концентрируется D_2O . Концентрация тяжелой воды опре-

деляется либо масс-спектрометрическим методом, либо измерением физических свойств, приведенных в табл. 21.

На заседании секции № 1 НТС 11 апреля 1947 г. слушали директоров ИФП А.П. Александрова и ГИАПа А.Я. Рябенко о проектных и изыскательских работах по технологии ректификации водорода. Секция одобрила предложение ИФП о строительстве опытной установки в этом институте мощностью 100 г/сут для изучения инженерных вопросов ректификации водорода и холодильной части с использованием различных источников сырья. Государственный институт азотной промышленности предлагал схему получения тяжелого водорода из коксового газа, а также методов комбинированного электролиза воды с ректификацией водорода в сочетании с изотопным обменом вода—водород. Было рекомендовано проектирование промышленной установки мощностью 10 т/год тяжелой воды методом ректификации водорода в комбинации с имеющимся производством электролиза воды. А.П. Александрову и А.Я. Рябенко было также поручено подготовить предложения по строительству производственных установок на ряде заводов исходя из работы как на чистом водороде, так и на коксовом газе.

12 декабря 1947 г. секция М.Г. Первухина слушала отчет директора Научно-исследовательского физико-химического института им. Л.Я. Карпова Н.М. Жаворонкова (эксперты А.П. Александров и Т.Ф. Слепухо) о получении концентрированной D_2O методом дистилляции воды под вакуумом. Была отмечена эффективность этого метода при условии использования отработанного пара низкого давления. Опытные установки сооружались при активном участии и постоянном контроле НИИ-42. В Минхимпроме уже в 1948 г. было организовано первое промышленное производство тяжелой воды. Процессы ее получения тре-



**АНАТОЛИЙ
ПЕТРОВИЧ
АЛЕКСАНДРОВ**
(1903–1994) —

директор
Института
физических
проблем с 1946 по
1955 г., академик
с 1953 г.

Директор
Института атомной
энергии
им. И. В. Курчатова
с 1960 по 1989 г.
Президент АН СССР
с 1975 по 1986 г.

буют больших энергозатрат. D_2O до сих пор является самым дорогостоящим замедлителем нейтронов. По оценкам, расход электроэнергии должен был составить 3–4 тыс. кВт·ч на 1 кг D_2O . Источником дейтерия должен быть водород, который используется в многотоннажных химических производствах. Исходным сырьем для опытной установки была выбрана азотно-водородная смесь, получаемая для последующего синтеза аммиака. В предложениях секции № 1 НТС «Ядерные реакторы» для получения D_2O предлагалось:

- спроектировать и построить установки конечного концентрирования;
- проверить ряд технологических циклов химической промышленности для выяснения возможности их кооперирования для извлечения дейтерия;
- создать единый научный центр, объединяющий физиков, химиков и инженеров, работающих над получением D_2O , на базе Физико-химического института;
- создать экспериментальный электролизный завод и дооборудовать Московский электролизный завод;
- обеспечить эксплуатацию имеющихся полужаводских опытных установок.

Технология получения D_2O была связана с большим риском. Интересно напомнить читателю, как директора институтов тогда получали задания на решение отдельных проблем атомного проекта. Вот как А.П. Александров описывает свое подключение к проблеме получения D_2O [111]: «Получаю приглашение на заседание Спецкомитета. Картина такая. Несколько военных. Курчатов, Ванников, Первухин, Малышев, Жданов, Махнёв (генерал, который занимался урановой проблемой), Мешик (отвечал за режим, арестован потом по делу Берии). Меня усаживают по одну сторону от Берии, по другую – Махнёв. Он докладывает: «Вот, Лаврентий Павлович, тов. Александров предлагает построить завод по получению дейтерия». Берия меня словно не видит, обращается к Махнёву: «А товарищ Александров знает, что опытная установка взорвалась?». Тот ему: «Да, знает... «А товарищ Александров знает, если завод взорвется, он поедет туда, где Макар телят гоняет?» Не выдерживаю: «Я себе представляю». Поворачивается ко мне: «Подпись свою не снимаете?» «Нет, не снимаю». Вот в таких условиях подключали тогда к решению урановой проблемы соисполнителей из других ведомств.

В последующие годы технология получения D_2O непрерывно совершенствовалась. При получении D_2O концентрации 99,8% (из природной воды) усилиями технологов увеличивались коэффициенты разделения, что приводило к сокращению ступеней электролитического концентрирования. Коэффициент электролитического разде-

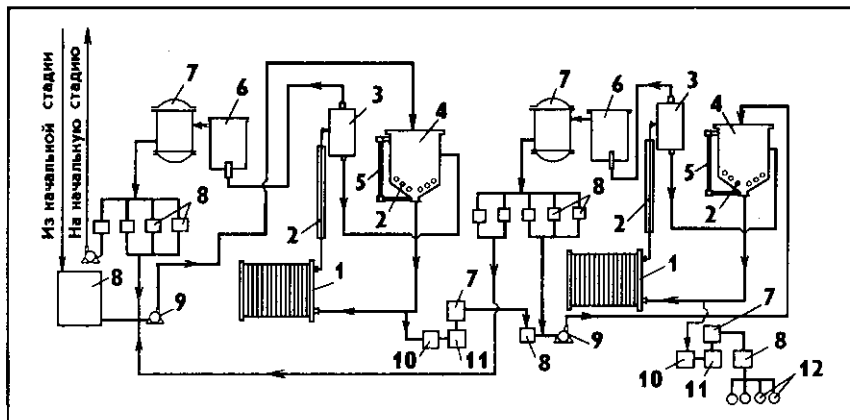


Рис. 22. Двухступенчатая схема конечного концентрирования тяжелой воды методом исчерпывающего электролиза с рекуперацией [110]:
 1 – электролизеры; 2 – холодильные элементы; 3 – разделители; 4 – баки;
 5 – указатели уровня; 6 – печи для сжигания газов; 7 – конденсаторы; 8 – приемные баки; 9 – насосы; 10 – нейтрализаторы; 11 – котлы; 12 – тара для продукта

ления изотопов водорода зависит от материала и состояния поверхности катода, его потенциала, состава электролита, наличия в нем добавок, плотности тока, температуры, длительности процесса электролиза и других факторов. Значения этого коэффициента трудно воспроизводимы. В работе [110] эти значения изменяются от 5,8 при 97°С до 17,5 при минус 19°С. В начальный период получения тяжелой воды метод периодического электролитического концентрирования широко использовался. Однако переменный объем электролита и изменение его состава в ходе процесса приводили к усложнению аппаратуры, коррозии оборудования и в итоге – к увеличению расхода электроэнергии на единицу продукции. Периодичность процесса и необходимость карбонизации электролита для полной отгонки воды приводят к большому расходу химикатов и затратам ручного труда и связаны со значительными механическими потерями тяжелой воды в производстве [110]. Опыт практической работы показал, что если концентрирование тяжелой воды осуществлять при начальной концентрации 3–5%, то достичь 99,8% можно на установке с двумя ступенями конечного концентрирования. Такая установка приведена на рис. 22. В процессе электролиза осуществляется естественная интенсивная циркуляция электролита через электролизер 1, разделитель 3 и бак 4 для электролита. Емкость бака в 20–30 раз превышает остаточный объем электролита в электролизере и коммуникациях. В начале операции бак и электролизер заполняются жидкостью, обогащенной по D_2O . Затем после полного опорожнения

бака остаток жидкости из электролизера и коммуникаций сливается в нейтрализатор 10. После отгонки воды полученный конденсат поступает на следующую ступень, которая отличается от первой только размерами аппарата. Опасность технологии связана с образованием гремучего газа, который отделяется от жидкости в аппарате 3 и сжигается в печи 6. Образующиеся при этом пары воды конденсируются в теплообменнике 7 и собираются в баках 8 для последующего возврата в цикл. В монографии [110] показана возможность получения сверхчистой D_2O с концентрацией 99,999%.

В табл. 22 для продуктов, получаемых при электролизе воды, приведен ряд физико-химических свойств, без знания которых невозможно осуществление технологического процесса. Периодические остановки оборудования и последующая подготовка его к работе требуют использования азота для продувки аппаратуры, поэтому в табл. 22 приведены данные как для азота, так и для воздуха.

Таблица 22

**Основные физико-химические свойства газов —
продуктов электролиза воды и азота [110]**

Свойства	N ₂	O ₂	H ₂	Воздух
Молекулярный вес	28,013	31,999	2,016	28,95
Мольный объем при 0°C и 760 мм рт.ст., л	22,4	22,39	22,43	22,46
Температура, °C:				
кипения	-195,8	-182,97	-252,8	-192
плавления	-202,86	-218,8	-259,2	-213
Критические константы:				
температура, °C	-147,13	-118,82	-239,9	-140,7
давление, атм	33,49	49,71	12,8	37,2
плотность, кг/л	0,311	0,430	0,031	0,35
Плотность:				
при 0°C и 1 атм, кг/м ³	1,251	1,429	0,0099	1,293
при температуре кипения, кг/л	0,888	1,14	0,0709	0,860
относительная (по воздуху)	0,9673	1,1053	0,0695	1
Удельная газовая постоянная, кал/(кг·°C)	70,93	62,12	986,96	68,61
Теплота, кал/кг:				
плавления	6,1	3,3	14,0	—
парообразования (при 1 атм)	47,58	51,5	108,5	49
Объем жидкости, образующейся из 1 м ³ газа, при 15°C и 1 атм, л	1,421	1,15	1,166	1,379

Исследовательский тяжеловодный ядерный реактор лаборатории № 3

Создание первого уран-графитового реактора, разработка и строительство тяжеловодного реактора проходили в основном под контролем секции № 1 НТС ПГУ. В течение 1947 г., когда выполнялся проект этого реактора, секция № 1 НТС неоднократно рассматривала отчеты основных разработчиков проекта.

16 января 1947 г. руководитель лаборатории № 3 А.И. Алиханов и главный конструктор ОКБ «Гидропресс» Подольского завода тяжелого машиностроения им. Г.К. Орджоникидзе Б.М. Шолкович докладывали о проектном задании по разработке опытного реактора. В числе поручений секции были:

- А.И. Алиханову представить дополнительные физические расчеты, а И.В. Курчатову их рассмотреть и представить на утверждение вместе с проектным заданием;
- А.И. Алиханову совместно с заместителями руководителя ПГУ А.П. Завенягиным и П.Я. Антроповым определить предельную длину урановых стержней, которая возможна при изготовлении на заводе № 12 в г. Электростали;
- Б.М.Шолковичу дополнительно рассмотреть вопрос о предельной мощности опытного реактора в 500 кВт.

На заседания секции № 1 приглашались не только ответственные разработчики, но и руководители ПГУ, министры других отраслей, предприятия и институты которых были ответственными за изготовление оборудования и аппаратуры для создания ядерного реактора в кратчайший срок. 29 мая 1947 г. при рассмотрении состояния проектирования и изготовления опытного реактора были приняты такие решения:

- обязать Б.М. Шолковича совместно с директором Центрального научно-исследовательского и проектно-конструкторского котлотурбинного института им. И.И. Ползунова (ЦКТИ) Л.А. Шубиным-Шубенко (Минтяжмаш) осуществить под научным руководством лаборатории № 3 комплексное проектирование физического дейтонного котла;
- поручить Подольскому заводу тяжелого машиностроения (директор Б.Г. Хабенский) изготовление физического дейтонного котла, комплексную поставку реактора в целом и проведение шефмонтажа;
- поручить Б.Г. Хабенскому укрепить ОКБ «Гидропресс» и создать на заводе производственный отдел и группу комплектации реактора;



**БОРИС
МИХАЙЛОВИЧ
ШОЛКОВИЧ
(1900—1965) —
главный
конструктор
опытного
тяжеловодного
реактора,
главный
конструктор
ОКБ «Гидропресс».**

—принять к сведению сообщение министра тяжелого машиностроения Н.С. Казакова, что персональная ответственность за проектирование, изготовление и поставку оборудования по физическому дейтонному котлу возложена на заместителя министра Т.Р. Бобырева;

—поручить А.И. Алиханову, И.В. Курчатову, Б.С. Позднякову, Б.М. Шолковичу к 10 июня 1947 г. решить вопрос о размещении и внешней защите опытного тяжеловодного реактора.

Мобилизация коллективов ЦКТИ, ОКБ «Гидропресс», лаборатории № 3, ГСПИ-11 и других соисполнителей, включая Подольский завод тяжелого машиностроения и завод № 12 ПГУ, позволила выполнить проект опытного тяжеловодного реактора уже к концу 1947 г. [112].

Кроме физических измерений на опытном реакторе с самого начала его проектирования предусматривалось получение радиоактивных изотопов. В техническом задании для первого отечественного тяжеловодного реактора была обоснована также необходимость проведения исследования по биологии, радиационной химии и металлофизике.

В отличие от построенного в лаборатории № 2 первого опытного уран-графитового реактора Ф-1 физический дейтонный котёл представлял собой сложную физическую установку со многими конструкционными особенностями и значительным количеством оборудования. Характерной особенностью тяжеловодных реакторов является и то, что в них образуется гремучая смесь, которую необходимо удалить и сжигать. В таких реакторах предъявляются повышенные требования к герметичности контура и проблемам безопасности. Другой особенностью таких реакторов является то, что

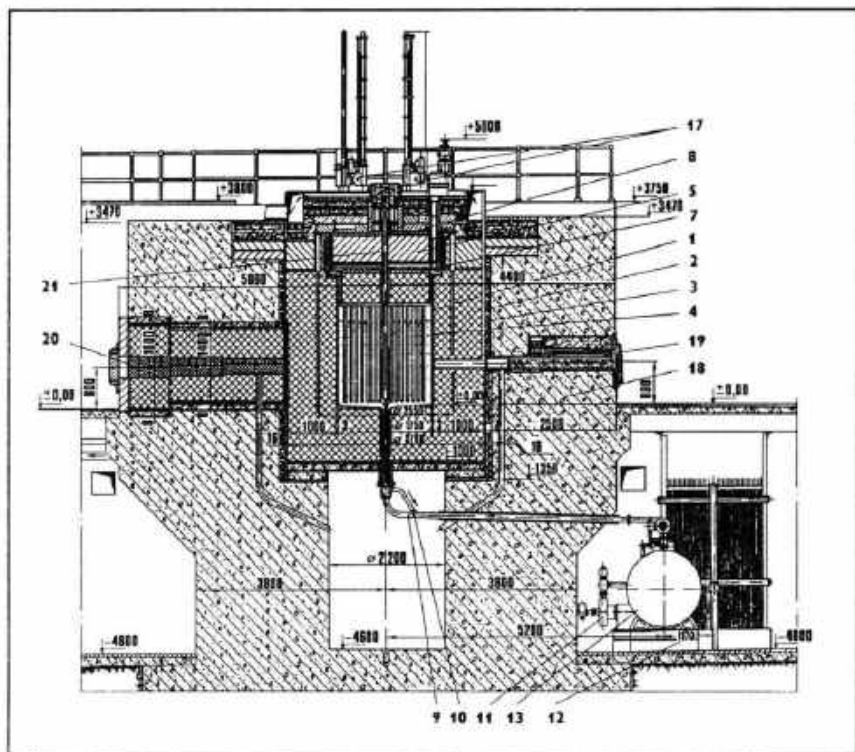


Рис. 23. Продольный разрез физического дейтонного котла [112]
(экспликацию см. по тексту)

на природном уране с тяжелой водой в корпусе реактора или другом оборудовании контура может произойти самопроизвольная цепная реакция. Критическая масса может вызвать такую реакцию, когда в системе $U-D_2O$ количество урана составляет 1,5–2 т. Поэтому конструкторы и проектировщики, создавая проект реактора, учитывали эти особенности.

Высокая стоимость тяжелой воды делала необходимым сокращение до минимума протечек и потерь этого замедлителя нейтронов, который был одновременно и теплоносителем. Контроль герметичности оборудования (в первом контуре) должен быть особенно надежным. Учитывая, что по образцу физического дейтонного котла проектировался, а затем был построен промышленный реактор, целесообразно рассмотреть подробнее конструкцию и схему работы реактора, построенного в лаборатории № 3 (рис. 23–25).

Тяжелая вода заливалась в тонкостенный алюминиевый резервуар / диаметром 175 см, толщиной стенок и дна 3–3,2 мм, высотой

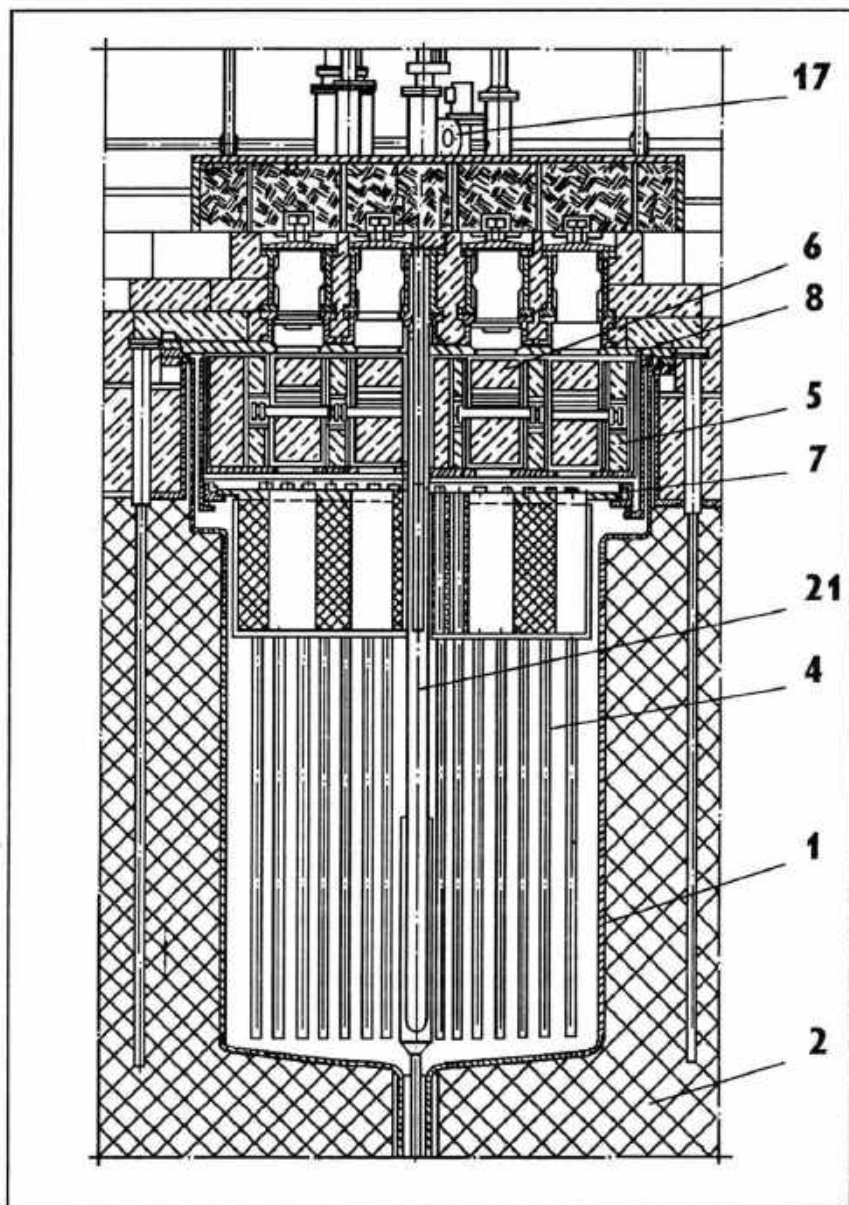


Рис. 24. Разрез реактора, показывающий расположение щелевых затворов [112] (экспликацию см. по тексту)

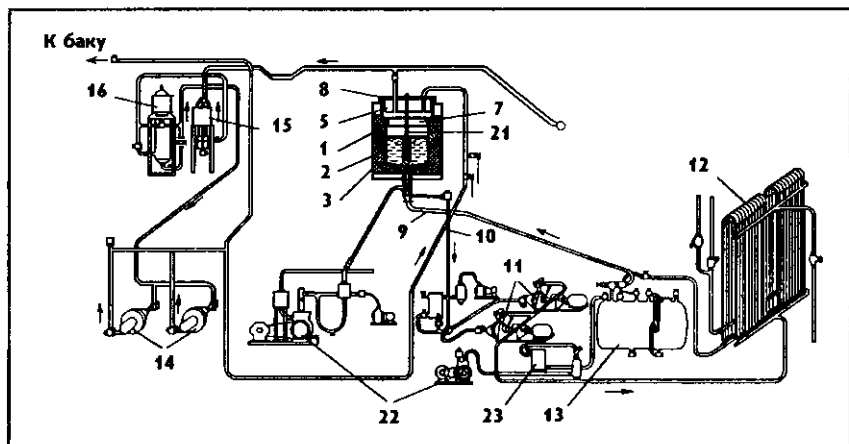


Рис. 25. Схема установки отвода тепла и работы остальных систем реактора [112] (экспликацию см. по тексту)

цилиндра 195 см. Дно этого бака установлено на графитовой кладке толщиной 100 см. Боковой графитовый отражатель 2 тоже имел толщину 100 см. Вся графитовая кладка помещалась во внешний герметичный стальной корпус 3, в котором должен поддерживаться вакуум. В проекте была предусмотрена возможность смены тонкостенного алюминиевого резервуара. Урановые стержни 4 подвешивались на вращающейся верхней плите 7, над которой располагалась свинцовая защитная крышка 5 с четырьмя щелевыми затворами 6. Выше свинцовой защиты находилась герметичная плита 8 из нержавеющей стали с четырьмя щелевыми уплотнениями для смены стержней. Такая конструкция плиты и затворов позволяла при их открытии и повороте вращающейся плиты подвести любой урановый стержень под щель и произвести его замену без разборки верхней защиты реактора. В плите имелось большое количество дополнительных отверстий, позволяющих менять шаг решетки урановых стержней. Через напорную трубу 9 D_2O подавалась в реактор снизу и сливалась в верхней части реактора. Сливная труба 10 опускалась по оси реактора и далее шла внутри напорной трубы. Затем вода поступала через циркуляционные насосы 11 в теплообменник 12 и возвращалась в реактор по напорной трубе. Скорость принудительной циркуляции D_2O в контуре была небольшой, поэтому мощность реактора определялась возможностью естественной конвекции и номинальная мощность равнялась 500 кВт. Циркуляционные насосы были рассчитаны на производительность $25 \text{ м}^3/\text{ч}$. Утечки тяжелой воды через насосы не превышали 10 г/сут . Для хранения D_2O был установлен запасной резервуар 13. В реакторе над тяжелой водой

находился гелий, его циркуляция осуществлялась газопродувками 14. Гелий уносил образующуюся в реакторе гремучую смесь вместе с парами тяжелой воды, которые осаждались в конденсаторе 15, а гремучая смесь сжигалась в контактном аппарате 16 на палладиевом катализаторе. Для ручного и автоматического регулирования мощности реактора были использованы четыре канала с поглотителями нейтронов в виде кадмиевых стержней. Моторные приводы 17, датчики регуляторов были смонтированы снаружи реактора. Боковая защита реактора 18 имела толщину бетона 2,5 м. Через горизонтальные каналы 19 выводились пучки нейтронов и γ -излучений для проведения исследований. Три канала были продолжены через графитовый отражатель до бака реактора. Для вывода пучка нейтронов из центра реактора был смонтирован вертикальный глухой канал 21 диаметром 9 см. В центре боковой защиты была размещена горизонтальная графитовая колонна 20 размерами $1,4 \times 1,4$ м, что достаточно для проведения большого количества исследований. Реактор был снабжен всеми системами контроля расхода D_2O и газа, уровня заполнения замедлителя, измерения температуры и давления. Все сосуды и трубопроводы были испытаны на вакуумную плотность. Особое внимание уделялось измерению концентрации гремучей смеси в газе. При необходимости ремонтных работ была предусмотрена осушка контура. Вакуумные насосы 22 позволяли вымораживать пары тяжелой воды в ловушках с жидким азотом 23.

На территории лаборатории № 3 в течение 1948 г. было построено здание реактора и закончен основной монтаж оборудования. Реактор был введен в строй в апреле 1949 г. На физическом дейтонном котле отработывались схема и конструкция первого промышленного тяжеловодного реактора, который предстояло построить на Южном Урале (комбинат № 817).

Для выбора оптимальной схемы загрузки в опытном реакторе использовались урановые стержни диаметром 2,2 и 2,8 см, имеющие оболочку из алюминия толщиной 0,1 см. Длина урановых стержней была соответственно 162,5 и 160 см. Шаг размещения урановых стержней в D_2O изменялся от 6,3 до 16,26 см. В табл. 23 приведены основные характеристики для 6 различных решеток тяжеловодного реактора, загруженного металлическим ураном естественного обогащения. Из данных табл. 23 видно, что число урановых стержней, образующих критический объем для разных шагов решетки, изменяется более чем в 3 раза. Минимальная критическая масса — 86 стержней диаметром 28 мм для шага решетки 16,26 см и 107 стержней диаметром 22 мм при шаге решетки 12,7 см — составляет $\leq 1,5$ т урана вместо 46 т для опытного уран-графитового реактора. Для промышленного тяжеловодного реактора диаметр урановых блоков был принят равным 22 мм.

Таблица 23

Критические параметры активной зоны тяжеловодного реактора [112]

Параметр	Стержни диаметром 2,8 см, длиной 160 см			Стержни диаметром 2,2 см, длиной 162,5 см		
Шаг квадратной решетки, см	11,5	13,8	16,26	9	12,7	6,3
Число стержней	120	120	86	272	107	292
Критический уровень D ₂ O в реакторе, см	131	120	148	118,5	174,5	181,6
Критический объем D ₂ O, включая боковую прослойку внизу и сбоку реактора, м ³	3,09	2,78	3,52	2,764	4,175	4,14
Объем активной зоны, м ³	2,02	2,64	3,28	2,52	2,86	*

* Часть объема была занята решеткой с шагом 9 см.

Полученные экспериментальные данные о размерах активной зоны реактора практически полностью подтвердили расчеты лаборатории № 3, доложенные А.И. Алихановым на НТС ПГУ еще 13 мая 1946 г. В его выступлении отмечалось, что для осуществления физического тяжеловодного реактора необходимо иметь 4 т тяжелой воды, 2,5 т изделий из металлического урана, 50 т графита, частично используемого в качестве отражателя нейтронов. В опытном реакторе предполагалось, что корпус реактора будет иметь диаметр около 2 м, а высоту примерно 2,3 м. С учетом отражателя эти размеры соответственно будут 3,3 и 4 м, а с биологической защитой — 9 и 5 м. Отмечая преимущества тяжеловодных реакторов по сравнению с уран-графитовыми, А.И. Алиханов в докладной записке НТС ПГУ писал: «Промышленная установка требует для ее осуществления при разных конструкциях котла разное количество урана, но практически ≤ 10 т в отличие от графитового котла, где требуется примерно 150 т. Следует здесь отметить еще одно достоинство D₂O как замедлителя. Оно заключается в том, что замедлитель в данном случае жидкость, притом издавна применяемая в энергетике». Предполагалось, что из реактора утечка нейтронов составит около 14%. Поэтому, чтобы не было непроизводительного выжигания ²³⁵U, А.И. Алиханов предлагал окружить реактор «ториевым чехлом»: «20 или 30 т тория в виде окиси или металла поглотит 80–90% этих убегающих нейтронов и даст примерно 2–3 г ²³³U в сутки. Плутония же при мощности реактора около 30 МВт в сутки будет нарабатываться 25–30 г». В докладе также отмечалось, что мощность реактора определялась лишь на основании грубых оценок и могла быть уточнена после выполнения всего проекта создания промышленного реактора.

Экспериментальный реактор ТТЛ в дальнейшем был реконструирован. В 1957 г. был заменен внутренний корпус реактора, увеличено до 2% обогащение ²³⁵U и была установлена мощность 2,5 МВт. Для

увеличения физических параметров реактора в 1963 г. его активная зона была переведена на загрузку ^{235}U 80%-го обогащения. Урановые блоки загружались в 64 технологических канала (по 7 блоков) с шагом решетки 13 см. Количество урана в активной зоне реактора составляло 3,3 кг, содержание D_2O в корпусе реактора – 4 т, а во всем контуре – 5 т. Расход D_2O составлял $100 \text{ м}^3/\text{ч}$. Температура теплоносителя на входе была 50°C , а на выходе 70°C . Для регулирования мощности в реакторе имелось 7 каналов поглотителей нейтронов (СУЗ). Указанные параметры позволили увеличить плотность потока нейтронов с $2,5 \cdot 10^{12}$ до $4 \cdot 10^{13} \text{ с}^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$.

Под научным руководством ИТЭФ были разработаны проекты тяжеловодных реакторов ТВР-С мощностью 10 МВт, которые с помощью СССР были сооружены в 1959 г. в Китае и Югославии [113].

В ИТЭФ реактор стал основной экспериментальной базой для проведения исследований по ядерной физике, физике твердого тела и физике ядерных реакторов. Основные научные достижения института были изложены в статье заместителя директора члена-корреспондента АН СССР В.В. Владимирского [113]. В 1960 г. на исследовательском реакторе ИТЭФ впервые в СССР был получен интенсивный поляризованный пучок тепловых нейтронов путем отражения нейтронов от намагниченных кобальтовых зеркал. В 1964 г. было обнаружено явление несохранения пространственной четности в процессе радиационного захвата нейтронов ядрами, обусловленное слабым нуклон-нуклонным взаимодействием. Этот результат в 1972 г. подтвердила группа американских физиков. Первые теоретические исследования проводили сотрудники ИТЭФ Ю.Г. Абов и П.А. Крупчицкий. Они были удостоены Ленинской премии. Открытие института было официально зарегистрировано. Другое открытие в ИТЭФ было сделано в 1972 г.: обнаружено явление Р-нечетной асимметрии разлета осколков деления, также обусловленное слабым нуклон-нуклонным взаимодействием.

Институт теоретической и экспериментальной физики с его экспериментальным реактором явился родоначальником целого ряда работ, которые ведутся во многих научных центрах мира. Нельзя не отметить работы с пучками резонансных и ультрахолодных нейтронов. Начиная с 1960 г. в институте были разработаны и опробованы нейтронные прерыватели с роторами, подвешенными в магнитном поле. Роторы помещались в вакуумированные кожухи и синхронно вращались без трения. Такой нейтронный прерыватель, используя метод времени пролета нейтрона, позволял измерять сечение взаимодействия нейтронов с различными ядрами в зависимости от энергии нейтронов. Идея создания таких нейтронных прерывателей принадлежала В.В. Владимирскому и была осуществлена в институте группой С.М. Калебина. Разработанный в ИТЭФ 4-роторный

нейтронный прерыватель был установлен на уникальном реакторе СМ-2 в Димитровграде (НИИАР). Плотность нейтронного потока достигала $5 \cdot 10^{15} \text{ с}^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$.

Все это позволило иметь в стране своеобразную «фабрику» нейтронных эффективных сечений. Кроме фундаментальных исследований на опытном реакторе ИТЭФ проводились прикладные работы. В течение длительного времени на реакторе нарабатывались различные радиоактивные изотопы. В 1987 г. реактор ИТЭФ был остановлен. В связи с изменением тематической направленности научных исследований предполагается использовать его лишь в качестве подкритического стенда для экспериментов с пучками заряженных частиц, получаемых на ускорителях.

Тяжеловодные реакторы имели ряд преимуществ перед уран-графитовыми. Особенно важным было то, что они требовали значительно меньшую загрузку урана, меньше основного материала активной зоны – замедлителя нейтронов на единицу мощности. Однако эксплуатация этих реакторов требовала особых мер по обеспечению ядерной, технической и радиационной безопасности, так как при их работе под действием нейтронов образовывался водород и появлялась гремучая смесь. На НТС ПГУ в 1946 г. неоднократно обсуждались проблемы выбора площадок для строительства этих реакторов. После многочисленных дискуссий было решено строить опытный реактор на площадке лаборатории № 3, а промышленный – на комбинате № 817 в Челябинске-40.

Первый проектный институт в атомной промышленности

Единственным генеральным проектировщиком всех реакторов был тогда Ленинградский ГСПИ-11. Он и до сих пор остается генеральным проектировщиком многих производств атомной промышленности, в том числе радиохимических заводов и заводов по разделению изотопов урана. Приказом Наркомтяжпрома СССР от 21 октября 1933 г. № 183 [114] было образовано специальное проектное бюро «Двигательстрой» (Набережная Красного флота, д. 6) в ведении Главного военно-мобилизационного управления Наркомтяжпрома СССР. В 1938 г. институт был переименован в ГСПИ-11, а постановлением от 21 января 1939 г. № 4 передан в Наркомат боеприпасов СССР. В Великую Отечественную войну ГСПИ-11 был эвакуирован в г. Киров, где работал по заказам 24 наркоматов, проектируя 89 оборонных заводов и комплексов. В 1944 г. институт был возвращен в Ленинград, а решением ГКО от 4 сентября 1945 г. № 996 был передан в подчинение ПГУ. В 1941–1945 гг. институт возглавлял А.И. Гутов, главным инженером был Ф.З. Ширяев. После передачи института в ПГУ его директором остался А.И. Гутов, а главным инженером был



**АЛЕКСАНДР
ИВАНОВИЧ
ГУТОВ**
(1907–1982) —
директор
ГСПИ-11
в 1944–1972 гг.

назначен В.В. Смирнов. Первыми работами ГСПИ-11 были проекты реконструкции наших старейших заводов (например, завода № 48 в Москве).

В структуре ГСПИ-11 были 18 отделов и проектных бюро, а также необходимые технические службы. (После реорганизации в 1955 г. в институте было образовано 6 бюро комплексного проектирования.) С 1946 г. в ГСПИ-11 заместителями главного инженера работали А.З. Ротшильд, А.В. Карандашев, А.А. Черняков, И.З. Гельфонд, а с 1949 г. — А.Н. Матвеев, который много лет был связан с атомной промышленностью.

Первые промышленные комбинаты и жилые поселки при них на Урале ГСПИ-11 стал проектировать уже в начале 1946 г. Площадки для Плутониевого комбината на Южном Урале, где кроме уран-графитовых реакторов впоследствии размещался и первый тяжеловодный реактор, были выбраны, согласно решению НТС ПГУ, еще 13 июня 1946 г. (протокол № 21). После представления А.А. Черняковым проектного задания на завод № 817, как он вначале назывался, было принято решение:

предусмотреть размещение предприятий завода общей площадью около 200 км² на южном берегу озера Кызыл-Тяш;

разместить первый уран-графитовый реактор А на высоте 270,7 м и расположить его между другими объектами;

радиохимический объект расположить на расстоянии примерно 2 км от ядерного реактора А;

площадки водоподготовки расположить на расстоянии 1,7 км от ядерного реактора А;

жилой поселок разместить на расстоянии 8–9 км от реактора А на берегу озера Иртяш.

В проектном задании были предусмотрены места расположения «отстойных прудов» и «складов осколков», т.е. радиоактивных продуктов деления, нарабатываемых в ядерных реакторах. В задании по энергообеспечению, одобренном НТС ПГУ, предусматривалось иметь «Систему электроснабжения завода № 817 для питания двух подстанций завода от трех независимых линий электропередач — Челябинской ТЭЦ, Кыштымской и Уральской подстанций (вторая очередь) и от собственной постоянно действующей ТЭС с двумя паровыми турбинами по 2–2,5 кВт». На этой же производственной площадке будущего комбината № 817 недалеко от цеха водоподготовки и была выбрана территория для строительства промышленного тяжеловодного реактора ОК-180.

К объекту предъявлялись повышенные требования безопасности: защита от внешних воздействий (падение самолета и т.д.), особые требования в переходных режимах (вывод на номинальную мощность, снижение мощности и заглушение реактора). Необходимо было избежать возникновения термических напряжений выше допустимых в металлических конструкциях реактора, включая его корпус. Поэтому кроме перечисленных источников энергообеспечения завода № 817 на реакторе ОК-180 был предусмотрен еще и дополнительный источник питания — аккумуляторные батареи.

Кроме комбинатов на Южном и Среднем Урале по проектам ГСПИ-11 впоследствии были созданы основные предприятия комбинатов № 816 (Томск-7) и 815 (Красноярск-26), а также первая в мире АЭС в г. Обнинске, сорокалетие которой отмечалось в июне 1994 г. По выданной институтом проектной документации были построены Сибирская, Ленинградская, Курская, Игналинская АЭС и уникальная опреснительная уста-



**ФЕДОР
ЗАХАРОВИЧ
ШИРЯЕВ
(1912–1990) –**

**главный
инженер
ГСПИ-11
в 1941–1945 гг.,
впоследствии
директор
ГСПИ-12**



**ВАСИЛИЙ
ВАСИЛЬЕВИЧ
СМИРНОВ**
(1896—1969) —
главный
инженер
ГСПИ-11
в 1946—1956 гг.

новка с реакторами на быстрых нейтронах (БН-350) в Казахстане. Как отмечал генеральный директор ВО «ВНИПИЭТ» В.А. Курносов, десяток закрытых и целый ряд открытых городов Минсредмаша СССР проектировали специалисты ленинградского проектного института. Среди них города Челябинск-40, Свердловск-44 и -45, Красноярск-26, Пенза-19, Шевченко в Казахстане, Навои в Узбекистане, города научных центров (Арзамас-16), академгородки в Новосибирске, Обнинске, Сосновом Бору и Димитровграде.

Обоснование разработки проекта промышленного реактора и основные исполнители

Опытный тяжеловодный реактор, или, как тогда называли, физический дейтонный котел, разрабатывался одновременно с промышленным дейтонным котлом под научным руководством лаборатории № 3. Участие ведущих институтов страны и заводов Минхимпрома СССР в получении D_2O и наличие уже действующих на заводе № 12 участков и опытных цехов по получению изделий из металлического урана позволили НТС ПГУ на основании предложений А.И. Алиханова и В.В. Владимирского в сентябре 1946 г. выдать нереальные рекомендации по срокам ввода промышленного дейтонного котла. Так, в решении НТС от 5 сентября 1946 г., на котором присутствовали члены совета Б.Л. Ванников, М.Г. Первухин,

Рансэ — Всесоюзный научно-исследовательский и проектный институт комплексной энергетической технологии. С 1990 г. бывший ГСПИ-11, его Уральское, Томское, Красноярское, Новосибирское отделения и отделение в г. Висагинас вошли во Всероссийское проектно-конструкторское, научно-исследовательское и технологическое объединение «ВНИПИЭТ».

И.В.Курчатов, В.А.Малышев, А.И.Алиханов, Н.Н.Семенов, А.П.Завенягин, Ю.Б.Харитон и Б.С.Поздняков, а также приглашенные руководители от ПГУ — В.С.Емельянов и Е.П.Славский, от Госплана — Н.А.Борисов, от Минэлектротехпрома — министр И.Г.Кабанов и др., было записано:

- проект промышленного дейтонного котла закончить в 1947–1948 гг.;
- ввести реактор в эксплуатацию к концу 1948 г. при поставке к этому сроку 20 т D_2O .

Всего лишь через 2 мес тот же состав совета (протокол от 11 ноября 1946 г. № 46), заслушав А.И.Алиханова, признал, что план лаборатории № 3 по вводу как физического, так и промышленного дейтонного котла нереален и составлен без учета поставок D_2O . К проектам реакторов необходимо приложить детальные инженерные расчеты, разработать методику очистки гелия, необходимого для «выдувания» образующейся гремучей смеси в результате разложения воды в дейтонных реакторах. Были сделаны и другие замечания. Однако до начала пуска опытного тяжеловодного реактора правительство постановлением от 6 апреля 1948 г. № 1127-462 поручило Минтяжмашу СССР разработку технического проекта конструкции промышленного реактора. Предполагалось, что проект будут разрабатывать ЦКТИ в Ленинграде и ОКБ «Гидропресс» в Подольске. Руководитель этого ОКБ Б.М.Шолкович уже имел опыт разработки не только опытного тяжеловодного реактора, но и уран-графитового реактора с горизонтальной схемой размещения ТК [39]. К концу 1948 г. Б.М.Шолкович подготовил проект конструкции тяжеловодного реактора для комбината № 817. Технический проект в январе 1949 г. был представлен научному



**АНАТОЛИЙ
НИКОЛАЕВИЧ
МАТВЕЕВ**
(1904–1991) —
заместитель
главного
инженера
ГСПИ-11 в
1949–1956 гг.,
а затем
главный
инженер

руководителю работ А.И.Алиханову на рассмотрение. Проект не имел достаточного экспериментального обоснования работы отдельных видов оборудования из-за отсутствия необходимых испытательных стендов в ОКБ «Гидропресс».

А.И.Алиханов отказался утвердить проект реактора и обратился к директору ГМЗ А.С.Еляну с предложением разработать новый проект промышленного тяжеловодного реактора. Согласие было получено, и в феврале 1949 г. новое техническое задание лабораторией № 3 было направлено в ОКБ ГМЗ. В нем были учтены проработки ОКБ «Гидропресс». Постановлением правительства от 26 марта 1949 г. № 1253-444 разработка проекта реактора была поручена ГМЗ (главный конструктор ОКБ – А.И.Савин, заместитель – В.Н.Солонов). На заводе было изготовлено 14 опытных стендов, проведен ряд испытаний. В августе 1949 г. технический проект реактора был закончен. Корректировка проекта по результатам стендовых испытаний велась до декабря 1950 г. Одновременно выпускались рабочие чертежи.

Площадка для строительства тяжеловодного промышленного реактора ОК-180 на комбинате № 817 была выбрана осенью 1948 г. Земляные работы начались летом 1949 г., еще до окончательного утверждения технического проекта. В создании реактора участвовали десятки институтов и заводов. Как отмечают ветераны лаборатории № 3, только при создании проекта изготовления урановых блоков, очехлованных алюминиевой оболочкой, было привлечено 56 организаций, в том числе 16 НИИ. В лаборатории № 3 основные работы по урановым, ториевым и холостым (алюминиевым) блокам велись в основном под руководством С.Я.Никитина и П.А.Петрова, а все другие работы по реактору – А.Д.Галаниным, А.П.Рудиком, Н.А.Бурговым, Б.З.Торлиным и многими другими под руководством А.И.Алиханова и В.В.Владимирского. В ОКБ ГМЗ весной 1950 г. был закончен монтаж полномасштабного стенда на 38 ТК. В натуральную величину были сделаны модель корпуса реактора и напорная камера, из которой тяжелая вода поступала в нижнюю часть бака (корпуса) в ТК для охлаждения поверхности урановых блоков. Технологические каналы также были выполнены из алюминиевых сплавов. Скорость теплоносителя (D_2O) в ТК составляла несколько метров в секунду. В межтрубное пространство с небольшой скоростью подавался замедлитель (также тяжелая вода).

На стенде в ОКБ ГМЗ отработывался метод разгрузки урановых блоков из ТК. Проблемы возникли сразу же после начала работы реактора. Было установлено, что при отключении циркуляционных насосов в напорном патрубке может произойти скопление урановых блоков, т.е. разгрузочный тракт может забиться. При разгрузке нескольких ТК (четырех) блоки практически полностью застревают и не попадают в специальный приемник. Представитель ГСПИ-11 (головной про-

ектный институт) В.Ф.Кобарев предложил усовершенствовать систему размывки разгружаемых блоков. Его схема, была проверена на стенде, позволяла одновременно размывать — освобождать «завал» даже от блоков из 16 ТК. Технология размывки испытывалась на холостых блоках из алюминия. Схема разгрузки требовала тщательной отработки, так как остаточное энерговыделение облученных урановых блоков тяжеловодных реакторов в 6–10 раз выше, чем блоков уран-графитовых реакторов. Поэтому их скопление в разгрузочном тракте при недостаточном охлаждении могло привести не только к перегреву, но и к расплавлению и прожигу стенок разгрузочного тракта, то есть к очень серьезной аварии. Следует напомнить, что при разработке технического задания на проект реактора ОК-180 рассматривались 2 варианта охлаждения урановых блоков.

В первом варианте замедлителем была тяжелая вода, а теплоносителем — обычная. Считалось, что охлаждать обычной водой урановые блоки в алюминиевых трубах много проще и проблем с их разгрузкой не возникнет. При этом существенно снижались потребности в тяжелой воде. Этот вариант был основным, и проектное задание было поручено разрабатывать Ф.И.Рылину.

Во втором варианте замедлителем и теплоносителем была тяжелая вода, что увеличивало потребность в ней. Однако в этом случае менее жесткие требования предъявлялись к герметичности межтрубного пространства, так как тяжелая вода, даже при протечках, не контактировала с обычной. Сложность второго варианта заключалась в том, что при разгрузке урановых блоков для передачи их в бассейны выдержки с обычной водой вместе с мокрыми блоками терялась тяжелая вода. Ответственным за разработку второго варианта был Н.Н.Кондрацкий (ГСПИ-11).

Для разгрузки урановых блоков сотрудники ГСПИ-11 Г.Н.Караваев и М.М.Кутаков вместе с Н.Н.Кондрацким предложили оригинальную конструкцию гидротранспорта, работающего на тяжелой воде. Благодаря этому решению впоследствии было отдано предпочтение второму варианту.

В отличие от опытного тяжеловодного реактора в промышленном реакторе под активной зоной расположена напорная камера, из которой тяжелая вода поступала снизу вверх в ТК и охлаждала урановые блоки (диаметр 22 мм, длина 75 мм). По предложению ГСПИ-11 в ТК ниже урановых блоков разместили своеобразный «держатель» в виде длинного «холостого» блока. После того как ТК сверху вытягивали на длину держателя, последний проваливался, а вслед за ним провалились и урановые блоки. Выпавшие из каналов блоки через нижнюю горловину напорной камеры попадали в подъемную трубу транспортной системы. В верхней части подъемной трубы урановые блоки проходили через специальную отбойную

решетку, где отделялась тяжелая вода и по сливной трубе возвращалась в контур теплоносителя. Урановые блоки с решетки попадали в транспортную трубу, а затем направлялись в специальных емкостях — кубелях в бассейн выдержки с обычной водой. Перед попаданием в кубеля урановые блоки осушались (обдувались) в транспортной трубе встречным потоком гелия и пары D_2O не попадали в обычную воду бассейна-выдержки.

* Оба варианта охлаждения реактора и разгрузки 24 мая 1948 г. были рассмотрены на заседании НТС ПГУ. Одобрен был второй вариант, и Н.Н.Кондрацкий был назначен главным инженером проекта. Общее научное руководство всем проектом осуществляли А.И.Алиханов, В.В.Владимирский, И.Д.Дмитриев и С.А.Гаврилов. Ответственными за разработку отдельных систем были назначены:

- системы регулирования мощности реактора и аварийной защиты — С.Я.Никитин и А.В.Зинченко;
- радиационная защита — Н.А.Бургов;
- коррозия и физико-химические процессы — Б.В.Эршлер;
- измерительные приборы теплового контроля — П.А.Петров.

Теплотехнические расчеты и выбор загрузки урановых, ториевых и холостых блоков, как отмечали ветераны лаборатории № 3, осуществлял П.А.Петров — автор известной монографии о ядерных реакторах [115]. Над разработкой проекта в ГСПИ-11 и лаборатории № 3 трудился большой коллектив.

Постановлением Совета Министров СССР от 26 марта 1949 г. № 1253-444 ГМЗ было поручено изготовление всего оборудования реактора. Главным организатором работ по изготовлению основных стелдов и оборудования был А.С. Елян. Руководителями конструкторских работ были также А.И. Савин, В.Н.Солонов, начальники лабораторий В.В.Коганов и Н.Н.Николаев, а также старший инженер А.И. Макаров.

На стендах ОКБ ГМЗ доработали систему гидросепарации. Было установлено, что продувка транспортной трубы навстречу падающим (выгружаемым из ТК) урановым блокам приводила к переносу значительного количества обычной воды в систему реактора, заполненного тяжелой водой. Поэтому от такой продувки гелием пришлось отказаться. Была отработана технология отделения урановых блоков от более легких холостых блоков. Для этого в гидросепараторе были смонтированы две решетки. Более тяжелые урановые блоки оседали на нижней, а более легкие холостые — на верхней решетках. На стенде ОКБ было проведено 1800 опытов, при этом было разделено 225,6 тыс. блоков и лишь 3 урановых блока попали в холостые.

Отдельные системы испытывались и в других организациях:

- в ОКБ-12 (С.А. Франкштейн) — макеты СУЗ, оно стало и разработчиком СУЗ;

- на Невском машиностроительном заводе (М.А. Агре) — гелиевые газодувки, которые и изготавливались впоследствии на этом заводе;
- в ПКБ-12 треста «Теплоконтроль» (В.К. Дмитриев) — все измерительные приборы.

По предложению А.И.Алиханова была создана Комиссия по коррозии оборудования тяжеловодного реактора. В нее входили Р.С. Амбарцумян (ВИАМ), Г.В. Акимов и Н.Д. Томашев (ИФХ) и Б.В.Эршлер (лаборатория № 3). С учетом рекомендаций комиссии было решено не анодировать корпус реактора и напорной камеры. Основными материалами, из которых они изготавливались, были алюминиевые сплавы САВ и АВ. Из алюминиевого сплава были изготовлены и теплообменники. Кроме контура тяжелой воды по проекту предусматривался второй контур, заполненный обычной водой. Требования к герметичности теплообменников между контурами были исключительно жесткими. Реакторы на D_2O были первыми реакторами, имеющими теплообменники. Их главным конструктором был также Б.М.Шолкович.

Благодаря усилиям многих коллективов, ответственных за изготовление и поставку оборудования, строители и монтажники комбината № 817 смогли в середине 1950 г. начать монтаж реактора ОК-180 и всех его многочисленных систем.

Пусконаладочные работы и начальный период эксплуатации реактора

Монтаж основного оборудования реактора начался в 1950 г. В течение 1950–1951 гг. рабочим местом многих сотрудников ТТЛ, работников ОКБ ГМЗ, ОКБ «Гидропресс», ГСПИ-11, разработчиков и изготовителей оборудования других заводов и конструкторских организаций становится строительная площадка тяжеловодного реактора*. Местом постоянного жительства научного руководителя тяжеловодных реакторов становится Челябинск-40.

Практически с конца 1950 г. академик А.И.Алиханов постоянно работает на объекте, обеспечивая вместе с Б.Г.Музруковым, Г.В.Мишенковым и другими руководителями комбината контроль монтажных и пусконаладочных работ на реакторе. Как вспоминают ветераны завода № 37 (Б.В.Горобец, Б.А.Кудрявцев и др.), часто академика можно было видеть в центральном реакторном зале и на других монтажных площадках. Его ближайшие помощники из ТТЛ непосредственно участвовали в наладке различных систем управления реактора и подготовке его к пуску.

* Реактор тогда называли «семеркой» (№ 7), а объект — заводом № 3. После ввода другого тяжеловодного реактора объект получил номер 37.

Сотрудниками ТТЛ были подготовлены все инструкции по обслуживанию сложных систем реактора. Эксплуатационному персоналу реактора был прочитан курс лекций, включающий вопросы физики реактора и обеспечения его безопасной работы. Лекции читали сотрудники ТТЛ В.В.Владимирский, Н.А.Бургов и др., конструкторы ОКБ ГМЗ, ГСПИ-11, ОКБ-12, а также специалисты из других организаций – разработчиков основного оборудования. Экзамены у обслуживающего персонала реактора принимала специальная комиссия с обязательным участием научного руководителя или его заместителя. Не всех допускали к работам по обслуживанию реактора.

При пусконаладочных работах первый контур был заполнен обычной водой, ТК загружены урановыми и холостыми блоками. Проводили наладку всех систем работы реактора, в том числе системы разгрузки блоков из ТК и разгрузочной петли. Эффективность тепловой компенсации технологического тракта проверяли нагреванием системы до 70°C. В каждой смене дежурили научные руководители, среди них А.И.Алиханов, В.В.Владимирский, Н.А.Бургов, С.А.Гаврилов, А.В.Зинченко, С.Я.Никитин, П.А.Петров. Начальником объекта был назначен А.А.Тарасов, главным инженером – один из ведущих сотрудников ОКБ «Гидропресс» И.Д.Дмитриев*. Первыми начальниками смен реактора ОК-180 работали Д.С.Юрченко², Г.С.Цветков, А.Е.Тимофеев, Я.А.Смычков и К.Н.Карих. Основными техническими службами руководили:

В.П.Григорьев – главный механик;

В.Т.Юсов – отделение вакуумной техники;

И.В.Морозов, В.И.Сурков – служба главного энергетика;

А.Ф.Попов, Е.И.Лахтиков, А.Мукин – службы КИПиА;

М.И.Циплухин – служба дистилляционных регенерационных установок;

О.С.Ларина – отделение загрузки и разгрузки реактора;

Я.П.Киселев – служба дозиметрии;

Л.А.Шуваев – группа учета работы реактора.

В службе главного механика сменными инженерами работали Б.В.Горобец³, Б.А.Кудрявцев, А.Ф.Грушанин, А.Ф.Кичаев, Н.И.Дудченко и единственная женщина-механик Симбика Ахмед-Шакирова. Ответственными за управление реактора старшими инже-

* И.Д.Дмитриев впоследствии был переведен в ГСПИ-11.

² Впоследствии работал директором объекта № 37, директором НИИАР в Димитровграде, заместителем главного инженера комбината № 816, а с 1969 по 1989 г. возглавлял Мангышлакский энергокомбинат в Казахстане, где был построен реактор на быстрых нейтронах (БН-350).

³ С 1954 по 1978 г. работал сначала начальником цеха, а затем главным инженером Приборостроительного завода в г. Златоусте-36. С 1978 г. работает в Минатоме сначала заместителем главного инженера, а с 1991 г. — начальником 6 ГУ.

нерами управления работали З.А.Васильева, В.Ф.Минько, Р.А.Рутенко, В.И.Иващенко, А.М.Кудрявцева. Впоследствии (с 1952 г.) в службе управления работали Г.А.Васильев, В.Ф.Гусев и другие выпускники специальных факультетов вузов Ленинграда, Москвы и других городов. Из них комплектовались и остальные службы реактора ОК-180, а также других реакторов, строившихся на комбинате.

Для проведения физических исследований в конструкции реактора был предусмотрен специальный горизонтальный канал. Уникальный пучок нейтронов этого канала с относительно большим пролетным расстоянием интенсивно использовался учеными ТТЛ для высокоточных измерений эффективных сечений взаимодействия нейтронов с различными материалами. На пучке нейтронов был установлен разработанный в ТТЛ под руководством В.В.Владимирского нейтронный спектрометр с механическим прерывателем. Плотность нейтронов на этом пучке была тогда самой высокой в стране. Сначала на спектрометре под руководством В.В.Владимирского работали сотрудники ТТЛ Н.А.Бургов, В.В.Соколовский, И.А.Радкевич и др., а впоследствии исследования проводили сотрудники лаборатории № 5 ЦЗЛ комбината Г.М.Драбкин, В.Н.Нефедов, Л.Г.Степанова, В.И.Орлов и др. Работам на нейтронном пучке большое значение придавал И.В.Курчатов. Посещая комбинат, он регулярно собирал участников работ для обсуждения полученных результатов измерения сечений взаимодействия нейтронов с ядрами различных элементов, а также исследований в области ядерной изомерии.

Первая крупная неприятность при проведении пуска наладочных работ была выявлена при обкатке второго контура, заполняемого дистиллятом обычной воды. В теплообменниках были обнаружены протечки озерной воды. Из-за вибрации отдельных трубок в теплообменнике при большой скорости воды нарушалась герметичность. По решению главного конструктора теплообменников (ОКБ «Гидропресс») часть трубок была удалена. Герметичность теплообменника вновь проверяли на обычной воде. Перед заполнением реактора тяжелой водой контур был промыт и осушен, для чего были использованы две цистерны чистейшего (технического) спирта. Спирт после использования был слит в реку Теча, рядом с которой у озера Кызыл-Тяш (на расстоянии примерно 200 м) и был построен реактор ОК-180.

Эксперименты по достижению критического состояния активной зоны (начало самоподдерживающейся цепной реакции) проводили на заполненных урановыми блоками ТК. При этом постепенно в контур заливали тяжелую воду и тщательно контролировали поток нейтронов. Руководили работами А.И.Алиханов, В.В.Владимирский, А.Д.Галанин и Н.А.Бургов. Всего в контуре работающего реактора находилось около 30 т тяжелой воды. Ее заливали в первый контур через крышку реактора вручную из бачков объемом 10 л. В активную зону было

загружено приблизительно 15 т урановых блоков. Каналы для загрузки тория были пусты. Перед выводом реактора на мощность весь первый контур заполняли гелием для деаэрации тяжелой воды. 17 октября 1951 г. был начат подъем мощности, и через несколько дней реактор был выведен на мощность до 100 МВт.

Как уже отмечалось, активная зона реактора была загружена твэлами — урановыми блоками (диаметр 22 мм, высота 75 мм) в оболочке из алюминия. Оболочка твэла через подслей была диффузионно сцеплена с урановым сердечником. Над технологией сцепления работали ученые ВИАМа (Москва, Р.С.Амбарцумян) и НИИ-13 (Ленинград, П.П.Пытляк). Р.С.Амбарцумян предлагал выполнить фосфатный подслей, а П.П.Пытляк — никелевый толщиной 2–3 мкм. На заводе № 12 в г. Электростали было изготовлено по 100 твэлов каждого образца и после испытаний предпочтение было отдано технологии П.П.Пытляка. Контроль плотности прилегания оболочки к урановому сердечнику был разработан профессором С.Я.Соколовым (ЛЭТИ) и инженером Б.С.Кроповым (НИИ-13). Ультразвуковой дефектоскоп Б.С.Кропова был принят для контроля продукции завода № 12.

Технология заводского изготовления урановых сердечников была разработана А.Н.Партиным. Урановые заготовки диаметром 70 мм и длиной 400 мм получали путем отливки. Сначала применяли графитовые изложницы, а затем перешли на стальные. Отливки в электропечах нагревали до 900°C, а затем прокатывали до диаметра 40 мм и охлаждали в воде. Полученные урановые стержни разрезали и прессовали при 600–625°C до диаметра 22,5 мм. После этого урановые блоки обтачивали и передавали на очехловку. Выгорание урана в реакторе достигало 160 МВт-сут/т, а накопление плутония составляло около 180 г/т. При этом в среднем образовывалось 200 г/т урана продуктов деления.

Аварийные ситуации, как и на уран-графитовом реакторе А, начались сразу же, в первый месяц работы реактора. В ноябре 1951 г. при понижении температуры воды в озере Кызыл-Тяш до 0–3°C в теплообменниках тяжелая вода замерзла (температура замерзания 3,8°C). Циркуляция D₂O в реакторе прекратилась. Реактор был немедленно заглушен. Однако из-за остаточного энерговыделения урановых блоков при отсутствии циркуляции тяжелая вода в ТК начала кипеть. Об этой аварии и других трудностях, возникших при разработке реактора ОК-180, можно судить из довольно красочного сообщения Е.П.Славского, содержание которого приведено в его беседе с А.П.Александровым и адмиралом флота В.Н.Чернавиным [116]. Дело было в канун отъезда А.И.Алиханова в Москву с объекта по завершении наладочных работ на реакторе. Во время прощального вечера Е.П.Славскому, работавшему с 1949 г. заместителем начальника ПГУ и находившемуся

в то время на комбинате, сообщили о прекращении циркуляции тяжелой воды в реакторе. Прямо на вечере он сразу же обратился к собравшимся: «Ну, братцы, садись в автобус и поехали... Алиханов, экспансивный такой, сначала не верил, что заморозило. Кричит: «Не может быть!» — Я: «Что не может быть? Циркуляция воды-то не идет!»... А у нас ворота чугунные, автоматические, за ними два теплообменника — большие такие цилиндры. Я говорю: «Пойдем туда посмотрим». — Они: «Да что пойдем, там же радиоактивность!» Ничего. Открываю, захожу, кладу руку — холодный теплообменник. Должен быть горячим: «А ну, подходите!» И только тут поняли, что произошло». Во избежание замораживания D_2O в теплообменнике впредь было принято решение не допускать в контуре обычной воды понижения температуры ниже $8^\circ C$. Фактически это была не авария, а аварийная ситуация, которая свидетельствовала о сложности эксплуатации тяжеловодного реактора. Термические напряжения, возникшие при остановке реактора, особенно при срабатывании аварийной защиты или быстрым подъеме мощности, иногда превышали допустимые. Поэтому были введены ограничения по скорости подъема и сброса мощности. Недолго работали теплообменники, изготовленные из алюминия. Вскоре они были заменены на новые, из нержавеющей стали.

Самая серьезная авария произошла на реакторе ОК-180 в системе разгрузки реактора, которая была в свое время тщательно отработана на стендах в ОКБ ГМЗ. В реакторе создалась ситуация, когда разгружаемые из нескольких ТК урановые блоки с плановой наработкой плутония застряли в системе разгрузочной петли — гидротранспорте. Скопление значительного количества блоков при большом остаточном тепловыделении привело к перегреву и расплавлению самих блоков, прогару элементов гидротранспорта и выводу из строя всей системы разгрузки реактора. Срочно были разработаны мероприятия для ликвидации этой радиационно опасной аварии, после чего реактор был вновь подготовлен к эксплуатации. Работами руководили непосредственно Е.П.Славский, начальник 4 Управления ПГУ А.Д.Зверев и дирекция комбината. Технология разгрузки реактора была изменена. Приходилось извлекать урановые блоки в завальцованных ТК через верх реактора — в центральный зал, а затем в бассейн выдержки, для хранения, перегрузки в емкости и подготовки их к отправке на радиохимическую переработку. Это привело к снижению наработки плутония.

Реактор работал в различных режимах. Сначала при загрузке природного урана на нем в основном нарабатывался плутоний, затем с 1954 г. при переходе на загрузку урановых блоков с обогащением 2% по ^{235}U в активную зону загружали торий для наработки ^{233}U . Отдельные каналы служили для наработки других изотопов, например ^{60}Co , ^{32}P и др. Это делалось в ограниченном масштабе, так как

физические характеристики реактора, работающего на природном уране, имели небольшой избыточный коэффициент размножения вторичных нейтронов и их хватало в основном только на поддержание цепной ядерной реакции. С переходом же на загрузку урана более высокого обогащения по ^{235}U стало возможным нарабатывать не только ^{233}U (из ^{232}Th), но и тритий (из ^6Li) для термоядерного оружия.

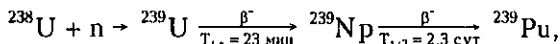
Реактор ОК-180 был остановлен в 1965 г. На заводе № 37 реактор ОК-180, размещенный в здании 401, был не единственным. Конструкторы ОКБ ГМЗ уже в 1953 г. в здании 401а начали монтаж другого тяжеловодного реактора — ОК-190. Ввод его в эксплуатацию состоялся 27 декабря 1955 г. Реактор проработал 10 лет и был остановлен 8 ноября 1965 г.

В дальнейшем усилиями эксплуатационного персонала завода № 37 и различных служб комбината № 817 с привлечением НИКИМТ (директор Ю.Ф.Юрченко) реактор был демонтирован. Опыт демонтажа частично был опубликован в 1990 г. [117]. После его демонтажа практически другой реактор — ОК-190м в здании 401а работал с апреля 1966 г. и был остановлен в 1986 г. [118]. На заводе № 37 директорами объектов 401 и 401а после А.А.Тарасова были Д.С.Юрченко, Г.С.Цветков и С.А.Аникин. На этом заводе впоследствии были построены реакторы другого типа, обеспечивающие более надежную их эксплуатацию. 16 июня 1979 г. на этом заводе в здании 401 был пущен реактор «Руслан», а в здании 401а — реактор «Людмила» [118].

В порядке проводимой на комбинате работы по упорядочению управления с 1 января 1971 г. завод № 37 был объединен с заводом № 24, где были построены уран-графитовые реакторы АВ-1 и АВ-2. Директорами объединенного завода № 23 работали Л.В.Кириллов, А.Ф.Гусев, а в настоящее время руководит этим реакторным заводом В.И.Садовников.

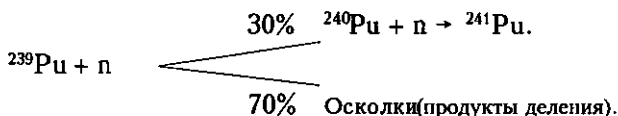
О некоторых преимуществах и недостатках тяжеловодных реакторов

Как уже отмечалось, загрузка урана в тяжеловодные реакторы почти в 10 раз меньше, чем в уран-графитовые. Следовательно, при одинаковой тепловой мощности реакторов в топливе тяжеловодного реактора во столько же раз более интенсивно происходит выгорание ^{235}U и накопление оружейного плутония. Кроме того, в тяжеловодных аппаратах более «чистый» изотоп ^{239}Pu . Действительно, согласно реакции

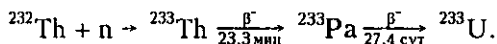


в ядерном реакторе определенная часть ^{239}Pu находится в виде ^{239}Np , который имеет период полураспада 2,3 сут. Чем дольше облучаются мишени, тем большее количество непутия переходит в плутоний.

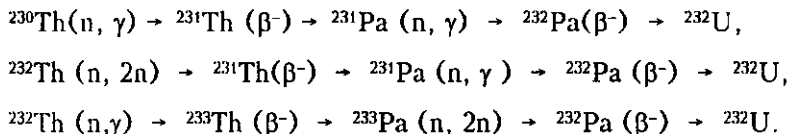
Сам же плутоний является ядерным горючим и способен делиться и превращаться в более тяжелые изотопы под действием нейтронов:



Частично он может переходить в ^{240}Pu , который является балластным, неделящимся изотопом. Так как в тяжеловодных реакторах плотность потока нейтронов существенно выше, чем в уран-графитовых, и длительность облучения урана во столько же раз короче, то в урановом топливе доля ^{239}Pu по отношению к ^{238}Pu будет выше. Поэтому ^{239}Pu будет меньше выгорать, а следовательно, доля примеси ^{240}Pu будет ниже. Эти рассуждения в значительной мере правомерны и при наработке в ядерных реакторах другого делящегося материала — ^{233}U из тория по реакции



Поэтому чем короче время облучения, тем меньше будет выгорать ^{233}U , тем меньше будет в нем примесей балластных, неделящихся изотопов ^{232}U и ^{234}U . Изотоп ^{232}U имеет период α -полураспада 72 года и образуется по нескольким ядерным реакциям при облучении нейтронами природного тория. В работе, выполненной под руководством профессора Э.М.Центера [93], проанализированы все основные реакции образования ^{232}U , как при облучении в реакторах природного и регенерированного урана, так и при облучении тория. Показано, что его присутствие в уране сильно ухудшает радиационную обстановку, так как его продукты α -, β - и γ -активны. При облучении ^{232}Th основные реакции



Эти реакции и опасность радиационного загрязнения ^{233}U тогда еще не были известны. Сам ^{233}U рассматривался как очень ценный ядерный оружейный материал, способный частично заменить ^{235}U или ^{239}Pu , получаемый из природного урана, запасы которого были тогда мало изучены.

Главным параметром, характеризующим эффективность делящегося материала, является количество вторичных нейтронов ($\nu_{\text{эф}}$), которые образуются при захвате первичного нейтрона ядрами ^{235}U , ^{233}U или ^{239}Pu . При этом ядра делящихся изотопов, захватив нейтрон, могут разделиться и мгновенно испустить вторичные нейтроны, а могут с определенной вероятностью захватить нейтрон и не разделиться, а перей-

ти соответственно в ^{235}U , ^{238}U и ^{240}Pu , т.е. в неделящиеся, балластные изотопы. Связь $\nu_{\text{эф}}$ с величиной $\bar{\nu}$ (среднее число образующихся нейтронов) определяется простой зависимостью $\nu_{\text{эф}} = \bar{\nu} (\sigma^+/\sigma_a)$, где σ^+ — сечение деления данного делящегося ядра; σ_a — суммарное сечение, характеризующее вероятность деления и радиационного захвата данного делящегося изотопа. Поэтому для физиков-ядерщиков, разработчиков ядерного оружия, величина $\nu_{\text{эф}}$ была важнейшей характеристикой оружейного ядерного материала. Как видно из табл. 24, она максимальна у ^{233}U . Следовательно, ^{233}U имеет минимальную критическую массу. Кроме того, его можно нарабатывать из ^{232}Th , которого в земной коре существенно больше, чем урана. По опубликованным данным, в земной коре среднее содержание тория примерно $12 \cdot 10^{-6}$ г/г породы, а урана — лишь около $4 \cdot 10^{-6}$ г/г породы. Правда, в океанической воде тория содержится около $(1-2) \cdot 10^{-9}$ г/л, а урана — в тысячу раз больше (около $1,3 \cdot 10^{-6}$ г/л) [120]. Поэтому усилия физиков в лабораториях № 2 и 3 в те годы были сконцентрированы на определении значений констант $\nu_{\text{эф}}$. Эксперименты проводили на нейтронных пучках и опытных реакторах Ф-1 и физическом дейтонном котле, а также на реакторах комбината № 817.

Таблица 24

Количество вторичных нейтронов, получаемых на один первичный нейтрон, поглощенный изотопами урана и плутония [119]

Страна	^{235}U		^{233}U		^{239}Pu	
	ν	$\nu_{\text{эф}}$	ν	$\nu_{\text{эф}}$	ν	$\nu_{\text{эф}}$
СССР	$2,5 \pm 0,1$	$2,065 \pm 0,025$	$2,6 \pm 0,1$	$2,28 \pm 0,025$	$3,0 \pm 0,12$	$2,035 \pm 0,025$
Великобритания	$2,45 \pm 0,15$	$2,04 \pm 0,04$	$2,46 \pm 0,15$	$2,18 \pm 0,08$	$2,86 \pm 0,18$	$1,90 \pm 0,07$
США	$2,45 \pm 0,03$	2,08	$2,56 \pm 0,03$	2,31	$2,93 \pm 0,04$	2,03
Мировые средневзвешенные данные [119]	$2,43 \pm 0,02$	$2,07 \pm 0,01$	$2,5 \pm 0,02$	$2,29 \pm 0,01$	$2,89 \pm 0,03$	$2,08 \pm 0,02$
Мировые согласованные значения [119]	$2,44 \pm 0,02$	$2,07 \pm 0,01$	$2,51 \pm 0,02$	$2,28 \pm 0,02$	$2,89 \pm 0,03$	$2,08 \pm 0,03$

На первых промышленных реакторах А и ОК-180 физические измерения в экспериментальных каналах проводили под контролем академиков И.В. Курчатова и А.И. Алиханова. Определение первых значений $\nu_{\text{эф}}$ для ^{233}U , ^{235}U и ^{239}Pu связано с именами В.Г. Ерозолимского, Н.Е. Спивака, Г.Н. Флёрова, В.В. Владимирского, С.Я. Никитина, Н.А. Бургова, Е.А. Доильницына, Е.Е. Кулиша, Г.М. Драбкина, В.Н. Нефедова и др.

Работникам комбината № 817, проводившим расчеты накопления различных изотопов в реакторах, а также уточнявшим инструкции по минимальным критическим массам и по выработке плутония и ^{233}U , знакомы полученные от И.В.Курчатова коррекции значений эффективных сечений и величин $\nu_{\text{эф}}$. Его указания были обязательны не только для работников комбината, но и для всех исследователей, работавших в лаборатории № 2, ТТЛ и других научных центрах. По сути дела, И.В.Курчатова стоял у истоков создания системы стандартизации и унификации ядерно-физических данных не только в системе ПГУ, но и в стране. Значения этих с большой точностью определяемых сечений σ_a и σ^+ и их сравнение с зарубежными данными представлены в табл. 25.

Таблица 25

Средние сечения захвата тепловых нейтронов делящимися изотопами (средняя скорость тепловых нейтронов 2200 м/с) [119]

Страна	$\sigma_a, \text{б}^2$			$\sigma^+, \text{б}$			$1 + \alpha$		
	^{233}U	^{235}U	^{239}Pu	^{233}U	^{235}U	^{239}Pu	^{233}U	^{235}U	^{239}Pu
СССР	590 ± 20	695 ± 20	1035 ± 20	525 ± 15	570 ± 15	715 ± 30	$1,1000 \pm 0,005$	—	—
Великобритания	587 ± 8	699 ± 11	1004 ± 24	527 ± 10	583 ± 10	717 ± 14	$1,11 \pm 0,02$	$1,20 \pm 0,02$	$1,40 \pm 0,04$
США	577 ± 4	682 ± 3	1030 ± 10	526 ± 4	581 ± 6	751 ± 10	$1,098 \pm 0,004$	$1,174 \pm 0,010$	$1,37 \pm 0,03$
Мировые согласованные значения	578 ± 4	683 ± 3	1028 ± 8	525 ± 4	582 ± 4	742 ± 4	$1,101 \pm 0,004$	$1,174 \pm 0,010$	$1,39 \pm 0,03$

* $\alpha = (\sigma_a - \sigma^+)/\sigma^+ + 1 + \alpha$ — коэффициенты, характеризующие долю нейтронов, которые захватываются делящимся материалом, превращая его в побочный, делящийся продукт. Этот вредный захват нейтронов минимален у ^{233}U .

* $1 \text{ б} = 10^{-24} \text{ см}^2$.

Впоследствии у нас в стране на базе ФЭИ в г. Обнинске был создан национальный центр по нейтронным данным.

На АЭС с тяжеловодными реакторами, как и в «военных» реакторах — наработчиках оружейного плутония, используется топливо из природного урана в отличие от легководных реакторов, в которых топливо изготавливается из урана, обогащенного ^{235}U . Преимуществом АЭС с тяжеловодными реакторами является независимость от поставщиков услуг по обогащению урана. Однако их эксплуатация связана с необходимостью снабжения другим дорогостоящим материалом — тяжелой водой. Кроме того, топливо из природного металлического урана не обеспечивает глубоких выгораний и часто перегружается.

Таблица 26

Атомные электростанции мира с тяжеловодными реакторами (на конец 1993 г.)

Год начала строительства	Год ввода в промышленную эксплуатацию	Электрическая мощность, МВт		Ким в 1992 г., %	Суммарное производство электроэнергии, МВт·ч
		брутто	нетто		
Аргентина					
1968	1974	357,0	335,0	73,80	2120484
1974	1984	648,0	600,0	82,50	1642977
Индия					
1964	1973	220,0	207,0	4,30	82493
1970	1984	235,0	220,0	59,70	1232474
1971	1986	235,0	220,0	36,90	761262
1976	1991	220,0	202,0	29,90	648340
1986	1991	220,0	207,0	50,40	974847
1976	1989	235,0	220,0	42,80	883649
Канада					
1966	1971	542,0	515,0	90,80	4323260
1967	1972	542,0	515,0	89,80	4277030
1966	1971	542,0	515,0	54,70	3081000
1971	1977	904,0	848,0	62,00	4919825
1970	1977	904,0	848,0	4,80	384475
1972	1978	904,0	848,0	77,90	6184819
1972	1979	904,0	848,0	78,90	6265993
1978	1985	915,0	860,0	85,20	6870200
1978	1984	890,0	837,0	70,40	5661900
1979	1986	915,0	860,0	85,00	6832000
1979	1987	890,0	837,0	72,30	5811800
1974	1983	685,0	640,0	82,00	4935676
1974	1983	540,0	516,0	29,90	1419780
1975	1984	540,0	516,0	90,20	4276910
1976	1985	540,0	516,0	82,90	3734560
1976	1986	540,0	516,0	93,50	4436170
1975	1983	680,0	635,0	86,80	5187102
1981	1991	935,0	881,0	17,50	143516
1982	1992	935,0	881,0	0,00	1042043
Пакистан					
1966	1972	137,0	125,0	0,00	550640
Республика Корея					
1977	1983	679,0	629,0	86,80	5177319

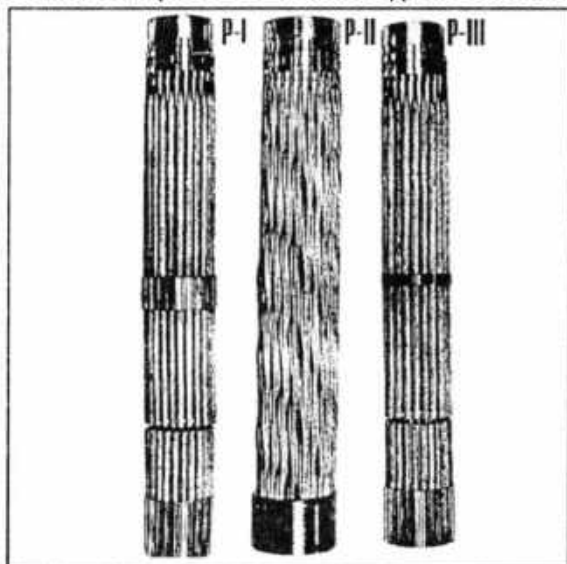
В настоящее время на 29 АЭС в 5 странах мира используются тяжеловодные реакторы, причем во всех этих странах и некоторых



Рис. 26. Первая чехословацкая атомная станция А-1

других (например, Румынии) АЭС с реакторами на тяжелой воде продолжают строиться (табл. 26).

В нашей стране в конце 1970 г. по просьбе правительства Чехословакии под научным руководством ИТЭФ совместными усилиями была создана АЭС с реакторами с тяжеловодным замедлителем. В конце 1972 г. в Ясловских Богуницах была введена в эксплуатацию первая в ЧССР атомная станция А-1 с тяжеловодным газовым



*Рис. 27.
Кассеты
активной зоны
тяжеловодного
реактора КС-150*



**ВИКТОР
ЕВГЕНЬЕВИЧ
ИВАНОВ**
(1908–1980) —
директор ХФТИ
с 1956 по 1980 г.,
академик
Украинской АН
с 1967 г.,
член-корреспондент
АН СССР с 1964 г.

реактором КС-150 (рис. 26). В качестве теплоносителя использовался углекислый газ, что позволяло сильно сократить количество тяжелой воды в контуре реактора. Твэлы (рис. 27) и кассеты (ТВС) разрабатывались в ХФТИ под руководством В.Ф.Зеленского. Охлаждение твэлов газом требовало сильно развитой поверхности охлаждения. Твэл состоял из металлического уранового сердечника, покрытого пластичной, прочно сцепленной с сердечником оболочкой. Для испытания кассет с твэлами на реакторе АИ на комбинате № 817 (Челябинск-40) были построены специальные петли, оснащенные газодувками и оборудованием, обеспечивающим заданные проектом параметры энерговыделения и скорости теплоносителя (CO_2). Начальником петли КС, ответственным за испытания, был В.И.Шевченко. При испытаниях было достигнуто выгорание ядерного топлива $(15\text{--}18) \cdot 10^3$ МВт·сут/т, что открывало хорошие перспективы развития ядерной энергетики с тяжеловодными реакторами. Как тогда писали, «создание реактора КС-150 — большой успех советских и чехословацких ученых» [10].

Уникальным был материал оболочки твэлов. Он представлял собой порошковый магниевый-бериллиевый сплав (ПМБ), компоненты которого имели минимальные сечения захвата нейтронов, что обеспечивало на природном уране большой коэффициент воспроизводства даже при значительной глубине выгорания урана.

Ценным в конструкции кассет было наличие специальных дистанционирующих муфт, которые крепились на твэлах, образуя в совокупности расчлененную решетку: «Муфты обладают демпфирующей способностью, что позволяет гасить вибрации твэлов и компенсировать в определенной степени изменение размеров твэлов

в поперечном сечении» [10]. Промышленное производство твэлов было организовано на заводе № 544 в г. Глазове.

Только для производства твэлов по разработкам ХФТИ в промышленность было внедрено 20 технологических процессов, создано около 15 типов нестандартного оборудования и приборов.

Нельзя не сказать о выдающихся работах сотрудников ХФТИ по изучению свойств бериллия, который не только использовался в материалах оболочек твэлов, но и нашел применение в оборонной технике. Исключительные свойства бериллия, особенно способность взаимодействовать с нейтронами (p , $2p$), делают его одним из лучших материалов отражателей нейтронов в любых ядерных реакторах, а также в ядерном оружии. Он используется и как замедлитель нейтронов. Как отмечали ветераны ХФТИ, «основная трудность использования бериллия в ядерной технике — его низкая пластичность, что усложняет процесс производства изделий и зачастую делает невозможным изготовление деталей сложной конфигурации. По этой причине для обработки бериллия неприменимы такие широко распространенные в металлургии операции, как литье с последующей ковкой, штамповкой, прокаткой и т. д.» [121]. Максимальный вклад в технологию получения бериллия, пригодного для использования в ядерной технике, внесли ученые ХФТИ Г.В.Тихинский, В.М.Амоненко, И.И.Папиров и другие под руководством директора В.Е.Иванова*. Бериллий (удельный вес $1,84 \text{ г/см}^3$) имеет достаточно высокие температуру плавления (1286°C), коррозионную стойкость, удельная прочность у него выше, чем у тугоплавких металлов и различных конструкционных сталей (до 500°C). Небольшая масса и высокая прочность сделали бериллий материалом, пригодным также для авиационной и ракетно-космической техники. В табл. 27 приведены данные, показывающие достижения ХФТИ при очистке бериллия от примесей.

Таблица 27

Содержание примесей в дистиллированном бериллии [121]

Материал	Примеси (по массе), $10^{-3} \%$					
	Fe	Si	Al	Mg	Ni	Cu
Исходный	650	300	100	50	30	20
После первой дистилляции	6	10	2	2	1	4
После второй дистилляции	1,2	3	1	1	1	—

В ХФТИ были разработаны физические, ядерно-физические, химические и физико-химические методы анализа металлов. Институт, работая в системе Минсредмаша СССР до 1990 г., ориентировался на

* Первым директором ХФТИ был И.В.Обреимов. Его сменил А.И.Лейпунский (1932–1937 гг.). С 1944 по 1965 г. директором института работал К.Д.Синельников, а затем (до 1980 г.) В.Е.Иванов.

получение высокочистых металлов с содержанием примесей 10^{-8} – 10^{-9} мас. %. Под руководством В.Е.Иванова в ХФТИ были разработаны технология и технические приемы вакуумной перегонки ряда металлов. Институт стоял у истоков создания порошковой металлургии.

Создание материалов с минимальным сечением захвата нейтронов для первых ядерных реакторов было особо актуальным. Кроме дейтерия и бериллия в реакторах использовался магний. При разработке сплава Mg–Be для оболочек твэлов реактора КС-150 в ХФТИ были изучены сплавы, в которых содержание бериллия изменялось от тысячных долей процента до 5% (табл. 28). Это было необходимо для обеспечения коррозионной стойкости оболочек твэлов, охлаждаемых углекислым газом в широком интервале перепадов температур [120].

Таблица 28

Коррозионная стойкость сплавов бериллия [120]

Содержание бериллия в сплаве, мас. %	Время до начала интенсивного разрушения, ч, при температуре испытания, °С	
	520	580
0,001—0,008	20—30	6
0,01—0,016	230	22
0,04—0,05	700—1000	90—100
0,09—0,15	3000	400—500
2—5	—	>10000

Учеными ХФТИ под руководством В.Е.Иванова, а затем сменившего его на посту директора В.Е.Зеленского изучалось влияние многих легирующих добавок на процесс окисления магния. Были изучены добавки и примеси, такие, как Mn, Zr, Th, Ce. Только добавки бериллия существенно повышали коррозионную стойкость магниевых сплавов в окислительных газовых средах вплоть до температуры плавления.

Уникальные материалы, такие, как бериллий и магний, а также тяжелая вода и газовый теплоноситель (CO_2) потребовали соответствующего отношения к технологической дисциплине и тщательного авторского контроля за эксплуатацией со стороны научного руководителя (ИТЭФ), главного конструктора реактора, основного разработчика твэлов и др. К сожалению, этого сделано не было. Большие усилия институтов и заводов Минсредмаша СССР и соответствующих предприятий ЧССР в целом окончились неудачей. Реактор КС-150 не был выведен на номинальную мощность. Основной причиной было несоблюдение технологической дисциплины при эксплуатации твэлов в реакторе и нарушение режима их хранения

в бассейнах выдержки. При попадании влаги жаростойкая оболочка из магниево-бериллиевого сплава разрушалась, что в конечном итоге сделало эксплуатацию АЭС невозможной. Определенное влияние на изменение интереса специалистов и руководства ЧССР к сотрудничеству по проблеме обеспечения работоспособности реактора КС-150 оказали известные политические события того времени.

В настоящее время АЭС с тяжеловодными реакторами по разработкам отечественных НИИ и КБ не эксплуатируются. Однако мировой опыт указывает на эффективность использования тяжеловодных реакторов в ядерной энергетике. Существенный задел в разработке этой реакторной концепции в нашей стране имеется.



Внашей стране родоначальниками широкого изучения запасов радиоактивных минералов являются академики В.И.Вернадский и А.Е.Ферсман. В 1939 г. по инициативе академика В.И.Вернадского председателем Совнаркома В.М.Молотовым было одобрено создание у нас в стране Урановой комиссии. В то время при Академии наук уже существовала Комиссия по атомному ядру, которую возглавлял С.И.Вавилов. Урановой же комиссии, как предлагал В.И.Вернадский, должны были быть предоставлены полномочия и финансы, чтобы она комплексно руководила всеми сторонами проблемы — поиском урановых месторождений, разработкой технологических схем переработки урановых руд, разделением изотопов урана, созданием необходимых запасов урана, составлением прогнозных геологических карт, а также совместно с Комиссией по атомному ядру координировала все работы по изучению и использованию внутриядерной энергии деления урана.

Не все крупные ученые, особенно физики, положительно отнеслись к созданию Урановой комиссии. Вот как описывает автор исторической повести [122] отношение крупнейших ученых-физиков к созданию урановой промышленности. На первом заседании вновь созданной комиссии в начале 1940 г. присутствовали В.И.Вернадский, В.Г.Хлопин, А.Ф.Иоффе, С.И.Вавилов, П.Л.Капица, А.Е.Ферсман, ученый секретарь Академии наук П.А.Светлов, два секретаря комиссии — минералог Д.И.Щербаков из ВИМСа и геохимик из РИАНа Л.В.Комлев и др. Докладывая о встрече с В.М.Молотовым, В.И.Вернадский отмечал, что тогда Канада, интенсивно добывая урановую руду, получала ежегодно 120 г радия, Бельгия интенсивно вывозила урановую руду из Конго. Уран нес переворот в технике, и наша страна не должна была отставать

в использовании энергии деления урана*. В.И.Вернадский считал, что комиссию должен возглавить физик, так как физики не только основные потребители радия в настоящем, но и главные заказчики урана в будущем. Что же отвечали академики — корифеи нашей физической науки?

А.Ф.Иоффе: «...Вряд ли можно ожидать в ближайшем будущем практической отдачи от деления урана. Другое дело — исследование этого процесса ...Здесь надо расширять фронт работ ...О срочном создании уранопроизводящей индустрии говорить рановато».

С.И.Вавилов: «Надо бы исследовать, нет ли в начавшемся за рубежом урановом буме какого-то трюка промышленных фирм. Потребность в радии возрастает с каждым годом, особенно же быстро в связи с войной, а уран можно рассматривать и как побочный продукт переработки радиоактивных руд. Уран накапливается на складах и от него хотят отделаться».

П.Л.Капица: «Спор — скоро или нескоро получим урановую энергию — зависит и от того, какую мы приложим свою энергию для овладения энергией урана. Выделим много средств, людей, материалов, сконцентрируем на этой теме основные силы, результат будет скорый, а нет — нет. Я — инженер и привык к любой сложной проблеме подходить по-инженерному».

Реакция В.И.Вернадского на негативное отношение физиков к созданию урановой промышленности была им высказана при обращении к В.Г.Хлопину: «Виталий Григорьевич, я не вижу энтузиазма у наших коллег физиков. Придется Урановую комиссию возглавить вам». Урановая комиссия начала работу. В ее состав дополнительно были введены молодые профессора: физик И.В.Курчатов, физико-химик Ю.Б.Харитон, геохимик А.П.Виноградов.

Прошло совсем немного времени, и жизнь показала, как заблуждались наши физики-корифеи и как был прав минералог В.И.Вернадский.

В конце 1942 г., когда руководству страны стало известно о ведущихся в Германии, Великобритании и США работах по использованию энергии деления урана в военных целях, было принято решение организовать в СССР добычу урановой руды. 27 ноября 1942 г. ГКО поручил Наркомцветмету приступить к производству урана из отечественного сырья. Комитету по делам геологии при Совнаркоме поручалось проводить разведку урановых месторождений. В 1943 г. в комитете были созданы отдел радиоактивных элементов и территориальные управления по геологии, а во Всесоюзном институте мине-

* В нашей стране радий в основном использовался медиками для лечения онкологических заболеваний, а физиками — для нейтронно-физических исследований. Источники нейтронов изготовлял РИАН, используя радий и продукт его распада радон.



**ДМИТРИЙ
ИВАНОВИЧ
ЩЕРБАКОВ**
(1893–1966) —
руководитель
сектора № 6 ВИМС,
академик с 1953 г.

рального сырья им. Н.М.Федоровского (ВИМС — основан в 1918 г. как головной институт в области прогнозирования поисков, разведки и изучения месторождений урана, черных, цветных и редких металлов, обеспечивал создание на Урале, в Сибири и в других регионах сырьевой базы оборонных отраслей промышленности) — специальный урановый сектор № 6. Его научным руководителем назначили известного ученого — ученика В.И.Вернадского, будущего академика Д.И.Щербакова (по его прогнозам открыты многие месторождения редких металлов). В секторе работало более 60 чел., среди них большая группа ученых, отозванных с фронта. В постановлении ГКО отмечалось, что начинать добывать уран необходимо на среднеазиатских месторождениях. Следовательно, самое первое мероприятие, которое реализовывалось правительством, состояло, как и предлагали В.И.Вернадский и В.Г.Хлопин, в накоплении запасов урана. Начиная с 1943 г. это решение стало выполняться путем добычи и переработки урановой руды в Таджикистане на Табашарском руднике.

Еще в 1930–1931 гг. Гиредмет проводил исследования по извлечению радия из руд Табашарского месторождения. К 1935 г. были построены небольшой поселок, рудник и гидрометаллургический цех. В 1941 г. в поселок Табашары был эвакуирован завод В Главного управления редких металлов Наркомцветмета и Одесский филиал Гиредмета. Было организовано производство солей висмута*, стронция и светящихся составов. На этом месторождении (рудник был перед войной законсервирован) в 1934 г. под руко-

* Впоследствии из висмута при облучении нейтронами будут получать полоний. Используя смесь ^{210}Po с бериллием, получают нейтронные источники.

водством профессора И.Я.Башилова велись работы по переработке урановой руды для получения радия [50]. В своих воспоминаниях З.В.Ершова отмечает, что еще в 1933 г. академик А.Е.Ферсман указывал на перспективность месторождения в Табашарах, которое было открыто в 1926 г., и месторождения Майлису, открытого в 1934 г.

8 декабря 1944 г. ГКО принял решение о создании в Средней Азии крупного уранодобывающего предприятия на базе месторождений Таджикистана, Киргизии и Узбекистана и передаче руководства этими работами из Наркомцветмета в НКВД. Постановлением ГКО от 15 мая 1945 г. в системе НКВД для добычи урана организуется комбинат № 6. Еще до создания Специального комитета и ПГУ в системе НКВД было организовано во главе с заместителем наркома А.П.Завенягиным 9 Управление, которому и устанавливалось тогда задание по добыче урановой руды, строительству различных объектов, призванных обеспечивать выполнение формируемой программы № 1 и поддерживать работы АН СССР под научным руководством И.В.Курчатова. В биографическом очерке о А.П.Завенягине отмечается, что он был привлечен к решению урановой проблемы в начале 1943 г. [33]. В кабинете И.В.Сталина был такой диалог: «Товарищ Завенягин... Вы металлург и горняк. Вам известно что-либо о запасах урана и графита?». А.П.Завенягин ответил, что ему ничего не известно в отношении урановых руд, а графит есть в Сибири — на Нижней Тунгуске, в районе реки Курейки. Задание, полученное от И.В.Сталина, было предельно кратким: «Необходимо найти и графит, и уран и немедленно начать добычу». Там же в кабинете И.В.Сталина состоялось знакомство А.П.Завенягина с И.В.Курчатовым. А.П.Завенягину подчинялся также Главпромстрой НКВД СССР, которому и было



**АВРААМИЙ
ПАВЛОВИЧ
ЗАВЕНЯГИН
(1901—1956) —**
заместитель наркома
внутренних дел по
строительству,
заместитель
начальника ПГУ,
начальник ПГУ,
заместитель
министра, министр
среднего
машиностроения

затем поручено строительство объектов будущего комбината № 6 в Средней Азии, а также комбинатов на Урале и ряда предприятий в других регионах.

1 октября 1945 г. комбинат № 6 и НИИ-9 передаются из НКВД в ПГУ. Первая сырьевая урановая база страны — комбинат № 6 был создан из 7 рудников и 5 заводов, в том числе:

- **завода В**, в составе которого был гидрометаллургический цех (завод № 4);
- **Табашарского** рудника (впоследствии рудоуправление) — предприятия № 11;
- **Адрасманского** рудника — предприятия № 12;
- **Майлисуйского** рудника — предприятия № 13;
- **Уйгурского** рудника — предприятия № 14;
- **Тюя-Муюнского** рудника — предприятия № 15.

В 10 км от Ленинабада (древнее название Ходжент) строился поселок Чкаловск. Впоследствии в Чкаловске будет построен основной гидрометаллургический завод комбината для переработки урановой руды с различных месторождений. Опытный гидрометаллургический цех в Табашарах (40 км от Чкаловска) был реконструирован и стал опытным заводом № 3* (директор Я.Б.Слонимский), на котором кроме руд Табашарского месторождения перерабатывались руды Майлисуйского, Уйгурского, Адрасманского и других месторождений. Проблема доставки руды была сложнейшей.

Как любил вспоминать П.Я.Антропов [123], в 1944–1945 гг. урановую руду на переработку по горным тропам Памира возили в торбах на ишаках и верблюдах. Не было тогда ни дорог, ни должной техники и технологии для переработки урановых руд. Условия же работы в урановых шахтах можно наглядно представить из рис. 28.

Первым директором комбината № 6 7 марта 1945 г. по предложению А.П.Завенягина был назначен полковник НКВД Б.Н.Чирков, который в 1940–1942 гг. работал на строительстве Джезказганского медеплавильного комбината в Казахстане. В конце 1942 г. стал директором Тырныаузского вольфрамо-молибденового комбината в Кабардино-Балкарии и обеспечил в 1942 г. эвакуацию персонала и стратегического сырья через Кавказский хребет⁷². На исключительную важность задач по добыче природного урана для создания атомной бомбы указывал И.В.Сталин. Как отмечал в своих воспоминаниях Б.Н.Чирков, принимая его в связи с назначением, Сталин сказал: «Американцы рассчитывают, что мы будем иметь атомную

* В 1948 г. завод № 3 был реконструирован и стал называться заводом № 6.

⁷² После перевода Б.Н. Чиркова в августе 1953 г. директором комбината в Желтых Водах (Украина) на комбинате 6 директорами работали Д.Т. Десятников, затем Г.В. Зубарев и В.Я. Опланчук.



Рис. 28. Подготовительные работы в забое урановой шахты



**БОРИС
НИКОЛАЕВИЧ
ЧИРКОВ**
(1906—1978) —
директор
комбината № 6

бомбу лет через 10—15 и строят на этом свою стратегию. У них этих бомб сейчас единицы, но когда они вооружат ими свои ВВС, то захотят диктовать нам свои условия. На это у них уйдет лет пять. Вот к этому времени мы должны иметь свою атомную бомбу. Тов. Курчатов заверил Политбюро, что при наличии урана этот срок реален. Для ученых, инженеров и для Вас, т. Чирков, эта задача по напряжению и ответственности равна усилиям военного времени. Вам будет оказано любезное содействие, будут представлены большие полномочия. Ваше предприятие ни в чем не будет ощущать недостатка». Главным инженером комбината № 6 был назначен А.Б.Драновский, которого впоследствии сменили Ф.С.Власов, А.А.Попов и П.И.Шапиро. Заместителем директора по геологии с 23 июня 1946 г. работал М.Ф.Зенин, а с 27 июня 1950 г. — А.А.Данильянц. На комбинате особо ответственной была роль строителей и до 1950 г. роль руководителя стройки выполнял директор Б.Н.Чирков. С 1 июля 1950 г. заместителем директора по строительству стал М.М.Хаустов, а затем К.В.Данилин, А.А.Смоленский. Строителями в основном работали заключенные переселенцы и военные. Их численность достигала 12 тыс. чел. Сразу же на комбинате создается центральная лаборатория, начальником которой в августе 1945 г. был назначен Ф.А.Бурдаков. Начальниками предприятия № 4 работали Г.Я.Сальман, А.Л.Левитский и В.К.Черкасов, главными инженерами — Я.А.Рубинчик, А.И.Антосиков, В.А.Ставский. Директором рудоуправления — основного подразделения, на базе которого создавался комбинат (предприятие № 11), 23 февраля 1945 г. был назначен З.П.Зарапетян, а главными инженерами работали К.А.Коровин,

В.З.Решетняк, А.П.Шепетков, который с 1953 г. переводится в г. Навои. (Впоследствии — главный инженер комбината в г. Навои.) Главным геологом рудоуправления с 15 февраля 1942 г. по 1 сентября 1946 г. работала С.Г.Сурикова, службы главного механика и энергетика возглавляли А.Е.Леонов и А.В.Терентьев. В составе рудоуправления были физическая и химическая лаборатории, начальниками которых работали Б.П.Калмаков и М.Ф.Русак-ова, а также несколько рудников начальники А.П.Шепетков, А.П.Вихрев, В.М.Штурбабин, Л.Х.Мальский, А.Д.Загорельский.

Отсутствие необходимого количества природного урана для обеспечения нужд строящихся объектов ПГУ (опытный ядерный реактор Ф-1 в Москве, промышленный реактор на Южном Урале и газодиффузионный завод на Среднем Урале) сделало стройки комбината № 6 первоочередными. Максимальные капитальные вложения выделялись уранодобывающим объектам. Об этом можно судить по выделенным на первый квартал 1946 г. объемам капитального строительства для предприятий системы ПГУ, млн. руб.:

Комбинат № 6 (Средняя Азия) . . .	12
Комбинат № 817 (Южный Урал) . .	10
Лаборатория № 2 и ее филиал	7
Комбинат № 813 (Средний Урал) . .	5
НИИ-9 (Москва)	4

Три указанных комбината были тогда основными предприятиями, ответственными за производство делящихся материалов, без которых невозможно создание ядерного оружия. Здесь уместно привести утверждение Э. Теллера о роли производств по получению делящихся (расщепляющихся) материалов [124]: «Производство расщепляющихся материалов — самый трудный момент в создании



**ПЕТР
ЯКОВЛЕВИЧ
АНТРОПОВ**
(1905—1979) — первый
заместитель
руководителя
Наркомцветмета
с 1939 по 1940 г.,
заместитель
начальника ПГУ
с 1945 г.,
руководитель ВГУ
с декабря 1949 г.
по март 1953 г.,
министр геологии
и охраны недр СССР
с 1953 г.,
заместитель
министра среднего
машиностроения
с 1956 г.



**ЗУРАБ
ПЕТРОВСВИЧ
ЗАРАПЕТЯН —**
директор комбината
в г. Навои с 1953 г.,
заместитель
директора
Центрального
института
ядерных
исследований
АН СССР (г. Пахра)
с 1971 г.

атомной бомбы. Когда страна достигает этого и успешно его осуществляет, то можно считать, что через несколько месяцев она будет обладать бомбой».

Строительство перечисленных важнейших для реализации программы № 1 объектов началось в конце 1945 г. В последующие годы затраты на строительство объектов атомной промышленности возрастали. Решение всех этих проблем, предусмотренных в программе № 1, требовало как создания новых объектов в системе ПГУ, так и реконструкции многих заводов и институтов других отраслей, работающих в интересах атомной промышленности. Объемы затрачиваемых страной ресурсов тогда не были известны не только широкой общественности, но даже и не всем членам правительства. Вот что через 30 лет писал президент АН СССР А.П.Александров [125]: «Теперь можно открыто и прямо сказать, что значительная доля трудностей, пережитых нашим народом в первые послевоенные годы, была связана с необходимостью мобилизовать огромные людские и материальные ресурсы, с тем чтобы сделать все возможное для успешного завершения в кратчайшие сроки научных исследований и технических проектов для производства ядерного оружия». Все это делалось, чтобы покончить с монополией США на обладание ядерным оружием, не дать им возможность диктовать свои условия всем странам мира. Правительством тогда было разрешено ввиду исключительной важности вновь создаваемой отрасли начинать строительство до завершения проектных работ.

В структуре ПГУ были особо выделены проблемы разведки и добычи урана, а также металлургического и химического производства.

Развитие комбината № 6 и урановых рудных районов на территории страны

Переданные в систему ПГУ предприятия комбината № 6 начали интенсивно развиваться. Уже в четвертом квартале 1945 г. опытный завод № 4 Наркомцветмета реорганизуется и переводится на самостоятельный баланс. Для строительства урановых рудников № 11–13 в системе НКВД создаются 3 отделения строителей, в основном из заключенных и специальных переселенцев.

К началу 1945 г. Табашарское рудоуправление было единственным действующим горнопромышленным предприятием, которое все еще находилось в стадии промышленной разведки и подготовки, а не эксплуатации. К концу 1946 г. отечественного урана было недостаточно даже для 50% загрузки опытного реактора Ф-1. В 1945 г. комбинат № 6 все же добыл 18 тыс. т урановой руды и выдал около 7 т урана. В 1946 г. был получен 40%-й концентрат солей урана в количестве 20 т.

Вся работа по реконструкции комбината направлялась и контролировалась до апреля 1946 г. секцией № 5 Инженерно-технического совета. Так, на ее первом заседании 3 января 1946 г. обсуждали технический проект технологической части заводов № 1–4, генеральные планы развития отдельных рудников и завода № 4, а также проектные задания по рудникам № 11–13. В состав секции входили: А. П. Завенягин, П. Я. Антропов, С. Е. Егоров, Н. Ф. Квасков, В. Б. Шевченко, профессор В. И. Спицын, В. С. Емельянов, Е. Д. Мальцев, руководители Государственного проектного института редких металлов Наркомцветмета (Гипрредмет, директор П. З. Бельский, главный инженер Б. Я. Безымянский). Секция № 5 регулярно рассматривала не только проблемы технологии выделения урана на комбинате № 6. В качестве примера можно привести задание НИИ-9. В протоколе секции от 8 февраля 1946 г. отмечалось:

- поручить В. Б. Шевченко продолжить изучение методов извлечения А-9 (так зашифровывался тогда природный уран, используемый в атомной промышленности) серноокислотным, карбонатным и водным выщелачиванием. Считать основной задачей извлечение А-9 из сланцев;
- изучить возможность комплексного извлечения А-9, молибдена, никеля и ванадия;
- составить не позднее 1 июля 1946 г. задание на строительство горно-химического предприятия для добычи А-9 на базе прибалтийских сланцев.

В этом решении НИИ-9 также поручалось составить до 1 мая 1946 г. проект разведочно-эксплуатационной штольни и опытного завода в районе, называемом тогда Сака-Силлямяэ (в настоящее время г. Силлямяэ, Эстония), на производительность по дроблению, из-

мельчению и обжигу около 100 т сланца в сутки. Секция оперативно решила вопрос, связанный с передачей в 1946 г. в ПГУ установки № 3 завода им. П.Л.Войкова для полупромышленных испытаний технологии извлечения урана из сланцев. Однако главные проблемы тогда были связаны с развитием комбината № 6. Руководством ПГУ было поручено восстановление в 1946 г. Тюя-Муюнского рудника. Было также принято решение осуществить углубление шахты № 2 на Табашарском руднике для скорейшего выяснения характера месторождений этого типа в зоне первичных руд. Созданное в ПГУ в 1945 г. Управление № 2 было призвано обеспечивать все эти работы необходимыми кадрами специалистов, оборудованием, материалами и контролировать сроки строительства и реконструкции. В составе управления был горный (начальник подполковник Д.Д.Протопопов) и металлургический отделы (начальник инженер-майор М.Н.Сапожников). В этом управлении в 1947–1953 гг. главным инженером работал бывший начальник Технического совета Наркомцветмета А.А.Задикян, а также известные ученые Д.Я.Суражский, Е.Д.Мальцев и другие организаторы урановой промышленности.

Секция № 4 НТС регулярно рассматривала состояние технологии переработки урановых руд. Так, 11 октября 1946 г. обсуждались технология переработки табашарских руд и материальный баланс урана на комбинате № 6. Было отмечено, что потери урана в отработанных растворах достигают 108 мг/л и обуславливаются несовершенством применяемой технологии. В 1946 г. средний коэффициент извлечения урана составлял только 56%. К совершенствованию технологического процесса были подключены НИИ-9 и институты АН СССР.

После разгрома Германии союзники направили на ее территорию специалистов, которые не только раскрывали секреты работы немецких ученых по различным проблемам получения ядерных материалов для оружия, но и выясняли наличие в своих зонах оккупации запасов урана. В конце 1945 г. уран был доставлен на подмосковный завод № 12 в г.Электростали, где из него получили урановые брикеты и даже урановые блоки для загрузки опытного ядерного реактора Ф-1. Для загрузки же промышленного ядерного реактора немецкого урана не хватило, и его основным поставщиком должен был стать комбинат № 6. Дополнительным потребителем природного урана становился и завод по получению ^{235}U 90%-го обогащения, который сверхсрочными темпами создавался на Среднем Урале в поселке Верх-Нейвинском. Второй завод по получению обогащенного урана электромагнитным методом строился тоже на Среднем Урале в Свердловске-45. Кроме того, строились новые ядерные реакторы в Челябинске-40 для наработки плутония и расширялось производство получения обогащенного урана в Свердловске-44, намечалось строительство объектов

потребителей природного урана в других регионах (Томск, Красноярск, Ангарск). Поэтому уже в 1947 г. для обеспечения потребностей промышленного реактора отечественным ураном усилиями руководства ПГУ и Главпромстроя НКВД СССР были введены на комбинате № 6 дополнительные мощности и добыча урановой руды в сутки достигала примерно 200 т. Но этого было явно недостаточно даже для одного работающего на мощности промышленного реактора, в котором нарабатывался плутоний. Активная зона реактора должна была в течение года несколько раз перегружаться.

Постановлением Совнаркома СССР от 13 октября 1945 г. для расширения добычи урана было поручено вести геологическую разведку в различных регионах страны. В Министерстве геологии и охраны недр было создано специальное Геолого-разведочное управление. Первые 15 лет были периодом становления урановой геологии. За это время было выявлено, разведано и вовлечено в эксплуатацию несколько небольших месторождений на Украине, Северном Кавказе, в Средней Азии [126].

Кроме месторождений в Средней Азии в 1946–1947 гг. были открыты железорудные месторождения, содержащие уран, на Украине (Первомайское и Желтореченское), на базе которых в 1951 г. был создан комбинат № 9. На Северном Кавказе открытые месторождения Бештау и горы Бык стали основой организации Лермонтовского рудоуправления. Уже в 1946 г. комбинат № 9 добыл 13,5 тыс. т руды и выделил 13,4 т урана.

Параллельно с разведкой месторождений на территории СССР были приняты меры по изучению возможностей поставок урана с территории Восточной Германии и Чехословакии, где в Саксонии (ГДР) и Чехии (Яхимово) уран добывали еще в прошлом веке. 23 ноября 1945 г. в Чехословакии договором между ЧССР и СССР была основана урановая промышленность. Взаимное соглашение между государствами предусматривало развитие яхимовских рудников в необходимых масштабах, а также совместные работы по разведке и эксплуатации рудников. В Чехословакии понимали, что американская монополия на ядерное оружие была тогда угрозой мирному существованию народов. Однако работа и исследования советских ученых в атомной области воспринимались как нарушение мира [127]. В октябре 1946 г. издается аналогичное постановление правительства по совместным работам с ГДР. 10 мая 1947 г. на территории ГДР было организовано отделение советского государственного акционерного общества «Висмут», в создание которого большой вклад внесли А.П.Завенягин и П.Я.Антропов.

Однако вывозимые из ГДР и Чехословакии руды*, а также развивающиеся мощности комбината № 6 не могли удовлетворить все

* Позднее была организована добыча урановой руды в Болгарии и Польше.

возрастающие потребности в уране. Под руководством Специального комитета и ПГУ были предприняты попытки быстрой наработки урана. Предлагалось даже использовать не только урансодержащие сланцы, но и руды месторождений черной металлургии и угольной промышленности, где добывали железо и каменный уголь. Было выяснено, что в составе железных руд имеются оксиды урана. К таким богатым железным рудам, содержащим уран, в Криворожском бассейне были отнесены руды Желтореченского и Первомайского месторождений. Министерству черной металлургии было поручено построить на этих месторождениях шахты для одновременной добычи урана и железа. В 1951 г. желтореченские и первомайские руды были переданы в ведение ВГУ при Совете Министров СССР*. В 1947 г. в Киргизии недалеко от озера Иссык-Куль было обнаружено, что в некоторых угольных месторождениях есть уран. Были разведаны и утверждены запасы Джильского угольного месторождения, содержащего уран. На их базе начало организовываться предприятие с условным названием «комбинат № 8». Технология переработки джильских углей заключалась в их сжигании в топках ТЭЦ с последующей переработкой золы на гидрометаллургическом заводе. Это угольно-урановое предприятие как неперспективное было ликвидировано в 1956 г.

Добыча урана в 1946–1949 гг. (табл. 29) позволяла обеспечить работу первого промышленного реактора и приступить к строительству других реакторов для наработки плутония, а также поставлять уран для получения высокообогащенного ^{235}U на газодиффузионном заводе. Однако разведанные запасы урана были ничтожно малы и недостоверны. Это отмечал еще в 1945 г. П.Я. Антропов, когда комбинат № 6 передали из НКВД в систему ПГУ: «...изучались только верхние зоны месторождений, а глубоких горных и буровых работ производилось очень мало. В результате чего выявленные запасы не дают оценки их подлинных масштабов...». И так было в течение длительного времени.

Главной проектной организацией для уранодобывающей промышленности был Гипроредмет. Руководители института входили в состав секции № 5 ИТС, а затем секции № 4 ИТС. Гипроредмет тогда практически подчинялся А.П. Завенягину, который говорил, что атомная промышленность отличается от обычной схемы создания новых производств в других отраслях промышленности тем, что в ней отсутствуют «элементы времени». Руководство ПГУ даже считало в тот период, что у себя не обязательно создавать институты и заводы: на атомную промышленность должны были работать любые предприятия страны.

Кроме Гипроредмета проектированием уранодобывающих рудников занимался в начальный период и НИИ-9. В институте было

* С 1949 г. вся уранодобывающая промышленность была выведена из подчинения ПГУ.

Таблица 29

Динамика разведанных запасов урана и его добычи в 1946—1950 гг.*

Год	Запасы, тыс. т			Добыча урана, т		
	СССР	Страны Восточной Европы	Всего	СССР	Восточная Европа	Всего
1946	0,37	—	0,37	50	60	110
1947	1,43	0,34	1,77	129	210	339
1948	2,54	1,14	3,68	182	452	634
1949	3,97	1,87	5,84	278	989	1267
1950	5,50	3,22	8,72	417	1640	2057

* Разведка запасов урана более интенсивно проводилась в СССР, а его добыча — в странах Восточной Европы.

создано проектно-конструкторское бюро (ПКБ), которое вело разработки по сланцам в Прибалтике, по лапаритам на Северном Кавказе, по комбинату № 8 в Киргизии.

Развитием предприятий комбината № 6 занимался Гипроредмет. Главными инженерами проектов были работники этого института Б.Я.Безымянский, К.С.Кушенский, Д.С.Кутепов. На площадке комбината создается специальное проектное бюро (СПБ-2) в составе примерно 250 чел., руководителем которого был М.Ф.Федорович, а затем Н.С.Загребельный и Т.Ф.Бабкин. С 1947 г. Гипроредмет был настолько перегружен проектными работами ПГУ, что в составе атомной промышленности кроме ГСПИ-11 решено было создать новый проектный институт в Москве — ГСПИ-12.

К концу 1948 г. комбинат № 6 был крупнейшим предприятием ПГУ. На нем работали >15 тыс. чел. Для сравнения отметим численность работающих на других предприятиях ПГУ:

Завод № 12 (директор А.Н.Каллистов)	10270
Комбинат № 817 (директор Б.Г.Музруков)	5070
Комбинат № 813 (директор А.И.Чурин)	3546
Завод № 48 (директор П.А.Растегаев)	2663
Завод № 544 (директор Ш.Л.Теплицкий)	2440
Завод № 906 (директор М.П.Аношкин)	673

Всего же в ПГУ в конце 1948 г. работали 55 тыс. чел. (без строителей), а также сотрудники более 100 привлеченных организаций.

В начале 1951 г. на комбинате были введены 4 капитальные шахты. В 1952 г. предприятие № 15 в Тюя-Мукуне было законсервировано. В 1951–1952 гг. на основании проведенных геолого-разведочных работ были законсервированы как бесперспективные рудники Аксай и др. На комбинате расширяется и реорганизуется Центральная на-



**НИКОЛАЙ
БОРИСОВИЧ
КАРПОВ —**

первый заместитель
начальника ВГУ,
начальник первого ГУ
Минсредмаша
с 1953 г.

учно-исследовательская лаборатория. В 1949 г. в ее составе работали 5 лабораторий: обогатительная — № 1, технологическая — № 2, физико-радиометрическая — № 3, химико-аналитическая — № 4, горная — № 5. Была построена своя электростанция, включающая энергопоезд № 10, паротурбинную электростанцию и дизельную станцию. С июня 1945 г. на комбинате работал ремонтно-механический завод, который с 1954 г. был реорганизован в завод горного оборудования. Тогда же были созданы следующие цеха: инструментальный, электроремонтный, металлоконструкций, кузнечный, термический, литейный и др. В 1950 г. вступил в эксплуатацию новый завод (№ 7) на Майлисайском месторождении. На базе рудника Майлисай в августе 1951 г. был создан Шахтстрой, получивший название предприятия № 21 в составе комбината № 6.

Ввиду исключительного значения добычи и переработки урановой руды постановлением правительства 27 декабря 1949 г. из состава ПГУ было выделено ВГУ при Совете Министров СССР. В состав ВГУ были переданы комбинаты № 6 и 7*, рудоуправление № 8 (Киргизия), заводы № 48 (Москва) и № 906 (Днеспроджержинск), Северное и Ермаковское рудоуправления, а также строительная организация. Начальником ВГУ назначается П.Я.Антропов, первым заместителем — опытный горный инженер, Герой Социалистического Труда Н.Б.Карпов, бывший начальник «Ворошиловградугля», а затем главный инженер всей системы угольной промышленности Донбасса. Заместителем П.Я.Антропова стал доктор технических наук Б.И.Нифонтов, который впоследствии с 1953 по 1965 г. работал ди-

* Предприятие в Сака-Силляме.

ректором ГСПИ-14*. В функции ВГУ входило решение всех проблем, связанных с организацией добычи урана из руд до получения окиси-заокиси урана (U_3O_8). Создание ВГУ во многом ускорило функционирование новых уранодобывающих предприятий и резко увеличило добычу природного урана.

В 1954 г. из состава комбината № 6 выделяются предприятия № 13, 14 и 21 (Майлисай) и на их базе организуется комбинат № 5, директором которого назначается А.Е.Степанец, а его заместителем — С.С.Покровский, впоследствии директор Приаргунского горно-химического комбината (ГХК). После реорганизации комбината А.Е.Степанец переводится руководителем Лермонтовского рудоуправления — на Северный Кавказ. В дальнейшем строятся другие комбинаты и рудоуправления. Добыча урана непрерывно увеличивается, и, как отмечается зарубежными авторами, в 1970 г. в СССР производили примерно 17500 т урана, в том числе 1800 т для мирных целей. Мировое производство урана в 1975 г. (без СССР) составляло 25 тыс. т. Разрабатывались руды с содержанием U_3O_8 около 0,2%. С ростом потребности в уране промышленное использование могут получить и руды с содержанием U_3O_8 до 0,02%. По оценкам 1974 г., доступные мировые ресурсы урана составляли 4,5–5,0 млн. т в рудах с содержанием урана примерно 0,1% [84,128].

По мере развития ядерной энергетики эти соотношения диаметрально изменялись. Из урана, поставляемого в СССР из стран Восточной Европы, на наших заводах изготовлялись твэлы для загрузки ядерным топливом реакторов АЭС ГДР, Венгрии, Чехословакии, Болгарии. Темпы роста мощностей уранодобывающей промышленности в СССР были настолько велики, что к 1990 г. на мировом рынке наша страна, накопив большое количество природного урана, могла продавать его в значительных количествах. По оценке фирмы NUKEM (ФРГ), в СССР на складах к 1991 г. находилось около 200 тыс. т урана, а во всех странах рыночной экономики примерно 150 тыс. т. Если в 1989 г. на мировом рынке было продано 7,73 тыс. т урана, то в 1990 г. — уже 15,8 тыс. т. В октябре 1990 г. была самая низкая цена урана — 19,2–21,7 дол./кг U_3O_8 [128].

В 60-е гг. были построены:

- **Восточный** горно-обогатительный комбинат в Кировоградском рудном районе на Украине;
- **Лермонтовское** рудоуправление в Ергенинском районе, рядом с Пятигорском;

* ГСПИ-14 был создан решением Совета Министров от 17 апреля 1951 г. и входил в состав ВГУ. Первыми его руководителями были Е.С.Экстров и В.В.Соловьев, главным инженером — В.Ф.Маслов, а с 1953 по 1965 г. — Е.Д. Мальцев.

- Прикаспийский ГХК в Мангышлакском рудном районе Казахстана;
- Навоийский ГХК в Кызыл-Кумском горном районе Узбекистана;
- Целинный ГХК в Северо-Казахстанском рудном районе;
- «Южполиметал» в Южно-Казахстанском рудном районе Киргизии;
- Малышевское рудоуправление в Зауральском районе;
- Приаргунский ГХК в Стрельцовском рудном районе Забайкалья.

Развитие же в Средней Азии комбината № 6 в период 1945–1954 гг. было особенно интенсивным.

На территории России с ее огромным прогнозным потенциалом природного урана объем разведанных запасов, отработка которых может быть рентабельна, составляет только 25% запасов всех стран СНГ. Эти рентабельные для добычи запасы природного урана сосредоточены в Стрельцовском рудном районе Забайкалья (рис. 29) [126].

Ниже приведена структура разведанных запасов урана на территории России на 1 января 1991 г., %:

При стоимости	1 кг урана	до 80 руб.		26
"	"	80–120 "		20
"	"	>120 "		54

При этом 9% разведанных запасов на то же время добывались подземным выщелачиванием (рис. 30) [129], а 91% – горным способом. [Выщелачивание силикатных и алюмосиликатных руд осуществляется раствором серной кислоты с окислителями (пиролюзитом, хлоритами натрия или калия, ионами трехвалентного железа)]. Кроме того, широкое распространение получил и открытый – карьерный метод разработки урановых месторождений. Он был основным при добыче комплексных урановых руд на Прикаспийском ГХК и других месторождениях (табл. 30, 31).

В США, Канаде, Австралии и ряде африканских стран урановая руда добывается в крупных карьерах.

Приведенные в табл. 32 классификация и усредненный выход твердых отходов горно-металлургического производства позволяют прогнозировать рост отходов и объемы занимаемых терриконов вблизи урановых шахт, а также площади хвостохранилищ рядом с гидрометаллургическими заводами. Для сравнения приведем данные о количестве отходов при добыче других полезных ископаемых [130]. На 1 т угля в среднем образуется 3 т отходов в процессе горнодобывающего производства и около 0,3 т отходов в процессе потребления, на 1 т стали – 5–6 т отходов в процессе добычи и 0,5–0,7 т в процессе ее переработки. При добыче же цветных металлов ввиду их более низкого содержания в рудах образуется ≥100–150 т отходов в процессе добычи и >50–60 т в процессах переработки. На

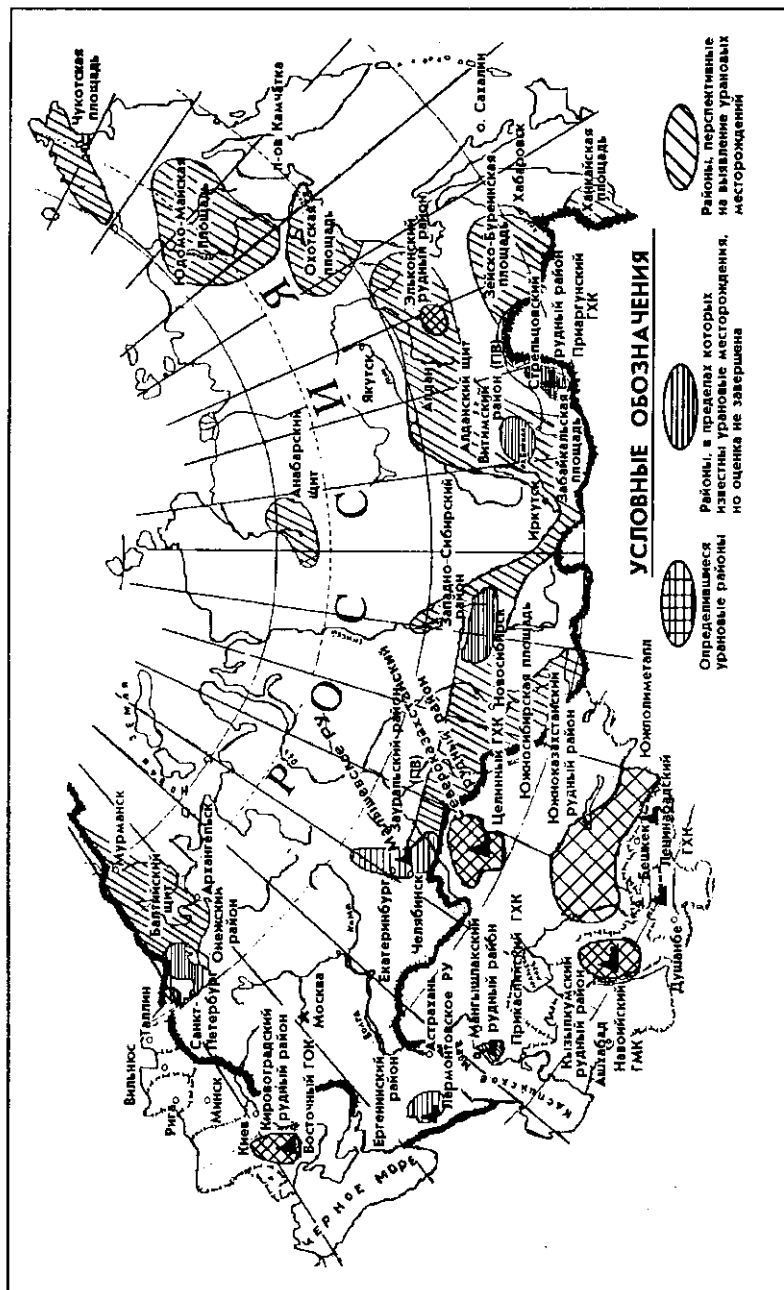


Рис. 29. Схема расположения урановых рудных районов и добывающих предприятий на территории СНГ и площадей, перспективных для выявления урановых месторождений в России

1 т редких, благородных и радиоактивных металлов образуется в связи с еще более низким их содержанием в рудах до 5–10 тыс. т отходов в процессе добычи и от 10 до 100 тыс. т в процессах переработки. Такое резкое возрастание отходов при все более широком использовании в народном хозяйстве редких и радиоактивных металлов с самого начала развития отрасли выдвинуло проблему создания малоотходных технологий в уранодобывающей промышленности как одну из важнейших.

На территории России неосвоенные рудные месторождения в целом с низкой рентабельностью находятся в следующих районах:

- Балтийский щит – Онежский район;
- Западно-Сибирский район;
- Алданский щит – Витимский, Эльконский районы;
- Зейско-Бурейская площадь;
- Хапкойская площадь (юг Приморского края);
- Охотская площадь;
- Юдомо-Майская площадь на севере Магаданской обл.;

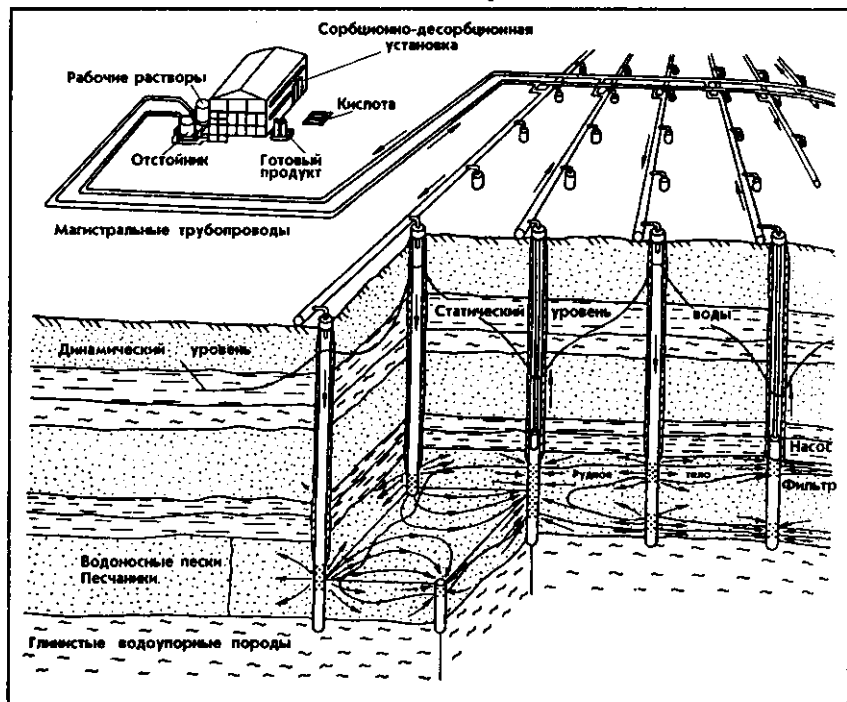


Рис. 30. Технологическая схема полигона подземного выщелачивания

Таблица 30

Сравнительные показатели добычи урановых руд подземным и открытым способами и подземным выщелачиванием [131]

Показатель	Рудник	Карьер	Подземное выщелачивание
Постоянный отвод земель относительно площади руд	1,2	1,6–1,7	0,1
Сброс дренажных вод в гидросеть относительно статических запасов, %	13,8	21,5–22,0	–
Сброс вод в хвостохранилище относительно статических запасов, %	22,0	23,0	1,1
Накопление пульпы в хвостохранилище	1,0	1,2	–
Соотношение запыленной площади	1,0	2,3	–
Нарушение ландшафта	Частичное	Полное	–
Объем добычи урана относительно запасов	1,0	1,25	1,40
Коэффициент извлечения урана из недр	0,70	0,81	0,88
Родоновыделение отходов добычи и переработки относительно подземных горных работ	1,0	1,2	0,03

– Чукотская площадь;

– Анабарский щит (верхнее течение р. Хатанги в Красноярском крае).

Подземное выщелачивание позволяет разрабатывать запасы бедных урановых руд, залегающих на различных глубинах в сложных геологических условиях, когда применение подземного – шахтного и открытого – карьерного методов экономически не оправдано. Еще на ранней стадии развития уранодобывающей промышленности ветераны отрасли, внесшие большой вклад в разработку метода, академик Б.Н.Ласкорин и профессор Б.В.Невский отмечали: «Подземное выщелачивание приобретает все большее промышленное значение, так как дает возможность более полно использовать недра за счет вовлечения в отработку

Таблица 31

Классификация карьеров и рудников по производительности, тыс. т/год (по руде) [132]

Размеры	Карьеры	Рудники*
Мелкие	До 100	До 20
Небольшие	100–500	20–50
Средние	500–1000	100–250
Крупные	1000–5000	250–1000
Очень крупные	5000	1000

* При подземной добыче 1 т урановой руды на поверхность извлекается, кроме того, $\geq 1,5$ –3 т отходов.

Таблица 32

Классификация твердых отходов

Источник отходов	Вид отходов	Выход от общего объема горной массы, %	Крупность, мм
Горно-капитальные выработки	Пустая порода	3–4	-350...-500
Подготовительные парзные выработки	Забалансовая руда, пустая порода	10–12	-350...-500
Очистные выработки	„	3–5	-350...-500
Отсортировка на радиометрической обогатительной фабрике	Хвосты	20–30	+50...-250
Кучное выщелачивание руд	„	33–47	-15
Гидрометаллургический передел товарной руды	„	17–22	-0,5...+0,043
	Песковые, илистые	32–47	-0,43

хорошо выщелачиваемых руд, не извлекаемых обычными методами» [132,133]. На месторождениях России этот метод добычи урана существенно не отрабатывался, но его придется развивать. Технология подземного выщелачивания различных урановых руд и другого минерального сырья детально рассмотрена в монографии профессора А.И.Калабина [134]. Расположение скважин и трубопроводов подачи рабочих растворов к рудному телу по этой схеме позволяет значительно сократить объем сооружений по сравнению с шахтным методом и методами открытой добычи полезных ископаемых (см. рис. 30).

Несмотря на практически полное прекращение использования природного урана для ядерного оружия, на территории России рентабельных месторождений урана недостаточно. По утверждению специалистов, на территории России нужна углубленная разведка для обеспечения АЭС ядерным топливом [126].

Переработка урановых руд

Ветеран урановой промышленности З.В.Ершова в 1937 г. вместе с профессорами В.Г.Хлопиным, Д.И.Щербаковым и другими специалистами Наркомцветмета и АН СССР обследовали состояние разработок урановой руды и ее переработки на Табашарском руднике: «Первое впечатление от знакомства с химической установкой, перерабатывающей радиоактивную руду, было ужасное, и практические условия работы были не лучше, чем в сарае-лаборатории Марии

Кюри в 1898 г.» [50]*. З.В.Ершова, по-видимому, тогда была первой женщиной у нас в стране, посетившей урановую шахту. Она пишет, что руководители завода, геологи и даже профессор Д.И. Щербаков отговаривали ее от спуска и осмотра шахты. «Пошутив, что спуск в шахту не страшнее, чем поездка одной в Париж, я надела шахтерский костюм и, как все мужчины-шахтеры, взяла шахтерскую лампу...».

В шахте комиссия, руководимая З.В.Ершовой, увидела «хищническую» выборку наиболее богатой руды, которая поступала на опытную переработку. «Добыча руды проводилась отбойными молотками, с потолка и стен стекала вода. Воздух был насыщен радиоактивной рудной пылью... руда складировалась на поверхности перед выходом из штольни. Здесь же проводилась ручная сортировка руды. Руда первого ручного обогащения... подносилась в ящиках с пробами к γ -электрометру Кольгерстера для определения по интенсивности излучения концентрации урана» [50]. Так что ручная радиометрическая сортировка руд в нашей стране на опытных урановых рудниках применялась еще в довоенный период.

Содержание урана в каждом месторождении представлено широкой группой минералов с различными свойствами². Если уран в основной массе руды рассеян в неурановых минералах, то методы механического обогащения вообще не могут дать ни хороших урановых концентратов, ни бедных по урану, сбрасываемых в хвостохранилище.

Обогащение урановых руд на первых этапах осуществлялось на основании опыта работы с другими полезными ископаемыми [132,133]. В основном процессе обогащения урановых руд решают две главные задачи: удаление из добытой горной массы возможно большего количества пустой породы; разделение остального рудного материала на такие продукты, которые по своему минеральному составу наиболее благоприятны для проведения последующих операций общей технологической схемы. При решении первой задачи использование дешевых методов обогащения обеспечивало рентабельное обогащение руд. Решение же второй задачи позволяет не только снизить себестоимость гидрометаллургических операций, но и облегчить возможность комплексного использования урановых руд.

В находящихся рядом с рудником «терриконах», куда направляются отвалы пустых пород и забалансовых руд, как правило, находится и хвостохранилище. В него сбрасывают не только рудничные (слаборадиоактивные) воды, но и хвосты гидрометаллургического завода (если он расположен недалеко). Общим свойством различных урановых пород является радиоактивность. Добытая в шахте горная

* С 1932 по 1938 гг. начальником лаборатории работал ее организатор, научный руководитель опытного завода Гиредмета по переработке урановой руды

² профессор И.Я. Башилов.

² Уран входит в состав более чем 150 минералов, компонентами которых являются щелочноземельные, редкоземельные и тяжелые металлы [133].

масса при транспортировке в вагонетках или других емкостях проходит под землей или на поверхности через радиометрические контрольные станции, на которых ведется учет добытого урана, удаления основной массы пустой породы в отвал и разделения руды по содержанию металла на заданное число сортов для последующей переработки. Сорта руды, где много пустой породы, подвергаются второй стадии радиометрического обогащения.

На рис. 31 приведена схема радиометрической обогатительной фабрики, на которой обеспечивается подготовка измельченной урановой руды для поступления на гидрометаллургический завод.

Вторая стадия радиометрического обогащения включает подготовительные операции: дробление (обычно до 150–200 мм), грохочение на 3–4 класса крупности, промывку классов, подлежащих радиометрической сепарации. Класс -30...+15 мм обычно не подвергается сепарации, тем более что в большинстве случаев он имеет повышенное содержание урана [132].

Технологические показатели радиометрической сепарации могут колебаться в широких пределах в зависимости от природных качеств руды, совершенства применяемой аппаратуры и правильности технологических приемов. В общем выход отвальных хвостов может достигать 70–80% (а иногда и больше) массы поступающего на сепарацию материала. На всех уранодобывающих предприятиях имеются службы рудничной геофизики, которые оснащены необходимыми методами контроля урана в различных объемах руды как на месте ее залегания, так и после отбойки в шахтах и извлечения на поверхность. Эти службы, используя радиометрическое опробование горных выработок, γ -каротаж скважин и шпуров, относительно быстро и дешево проводят оконтуривание рудных тел и подсчет запасов урана при отработке месторождений. Радиометрическое обогащение осуществляется при помощи рудосортировочных машин или сепараторов. Они состоят из радиометра с датчиком, отбирающих (разделяющих) механизмов, обеспечивающих подачу рудного материала в зону измерения и удаления продуктов сепарации. Этот способ обогащения продолжает развиваться благодаря успехам радиоэлектронного приборостроения и ядерной физики.

Кто же решал эти многочисленные научно-технические, технологические задачи переработки урановых руд и получения оксидов урана?

С созданием ВГУ при Совете Министров СССР работам по добыче урановых руд и их переработке был придан существенно больший размах. Одновременно с созданием ГСПИ-14 по инициативе руководителей ВГУ и в его системе постановлением правительства от 17 апреля 1951 г. организуется технологический институт (НИИ-10, затем ВНИИХТ) на базе 9 лабораторий Гиредмета. В НИИ-10 были переданы рудно-геологическая, электрохимическая лаборатории, 5 лабораторий

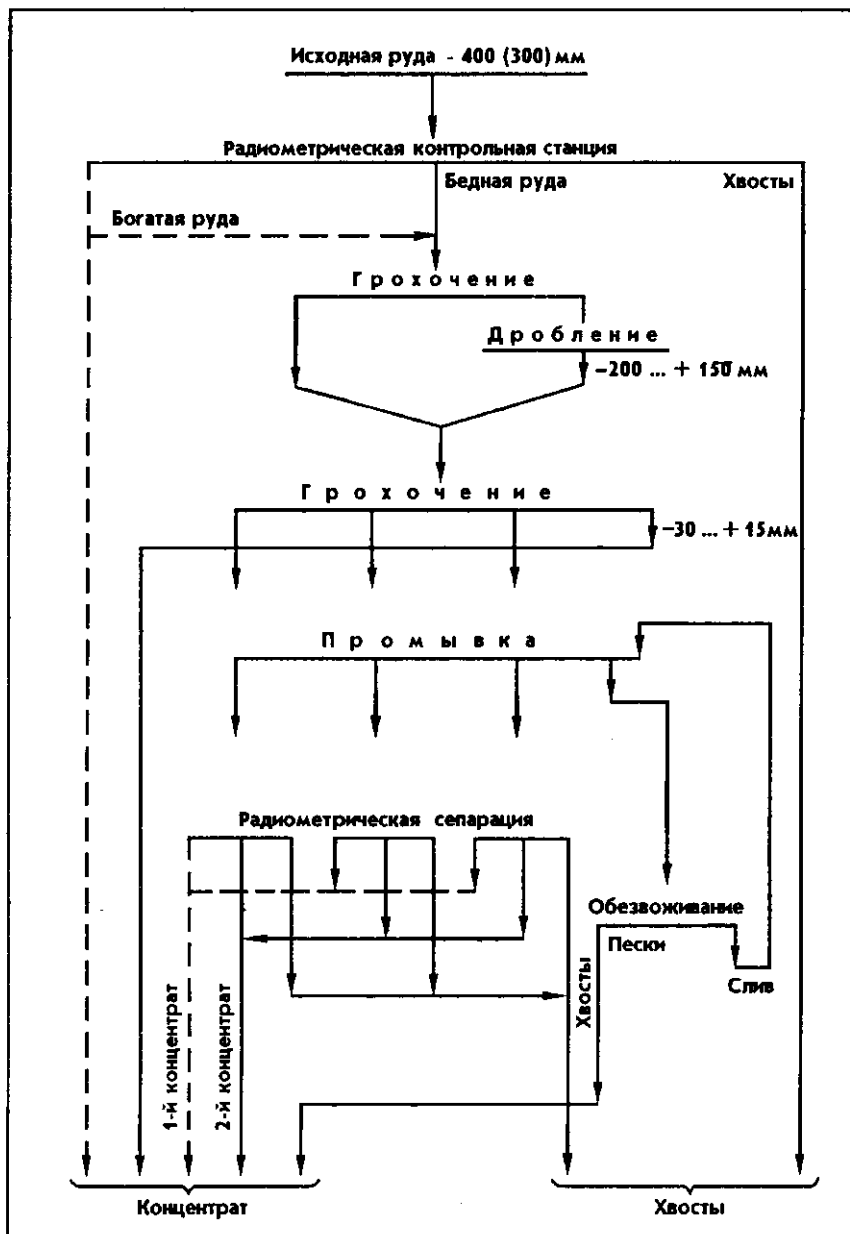


Рис. 31. Типовая схема радиометрической обогатительной фабрики



**ПЕТР
ИВАНОВИЧ
БУЧИХИН**
(1907–1992) —
директор НИИ-10
(ВНИИХТ_а)

обогащения урановых руд и производственно-аналитическая лаборатория физических методов анализа. На вновь созданный институт были возложены следующие задачи:

- изучение геологии, минералогии и генезиса важнейших месторождений урана в СССР и странах народной демократии;
- разработка геофизического оборудования и оснащение им действующих урановых рудников;
- разработка промышленных технологических схем обогащения бедного уранового сырья;
- создание высокоэкономичных технологических схем гидрометаллургической переработки урановых руд и концентратов;
- исследования отдельных проблем горных работ на урановых рудниках;
- разработка аналитического контроля и систем автоматизации производства.

Для решения этих задач в институте были созданы все необходимые технические подразделения и научно-исследовательские лаборатории. Директором института был назначен П.И.Бучихин, его заместителями по научной работе — Г.А.Меерсон, по геологии — А.А.Якшин*. Постановлением правительства от 29 декабря 1951 г. из НИИ-9 в НИИ-10 передается установка № 3 (опытный завод), первым начальником которой с 17 апреля 1951 г. был Н.С.Богомолов. К работам НИИ-10 приказом по ВГУ от 6 февраля 1952 г. был привлечен Подольский опытный завод, дирек-

* С января 1957 г. директором НИИ-10 работал А.П. Зесфилов, заместителями директора по науке — П.И. Бучихин, по геологии — Д.Я. Суражский (с 1 июня 1955 г.).

тором которого стал Д.Д. Соколов*, а его заместителем по научной работе – Г.Е. Каплан.

На гидрометаллургическом заводе первыми подготовительными операциями при переработке урановых руд являются их дальнейшее дробление и измельчение. Обычно для более полного контакта выщелачивающего реагента с урановыми минералами измельчение доводят до крупности от 0,5 до 0,074 мм [132]. Необходимая степень измельчения определяется тонкостью вкрапления урановых минералов, пористостью руды и интенсивностью действия выщелачивающего реагента. Если применяется кислотное выщелачивание, то оно допускает более крупный помол, чем карбонатное (содовое). Дробление и измельчение урановых руд производится в обычных аппаратах (дробилки и шаровые мельницы, применяемые и для других руд). Для контроля крупности дробления применяются обычные грохоты, классификаторы и гидроциклоны.

Работа гидрометаллургического производства непрерывно совершенствовалась [132,133]. Были внедрены новые методы дробления и измельчения урановых руд: бесшаровое дробление и измельчение в мельницах большого диаметра (мельница «Каскад»); струйное измельчение; бесшаровое измельчение в кислой среде, то есть совмещенное с выщелачиванием. Использовались и шаровые мельницы. Поэтому гидрометаллургические заводы были насыщены большим количеством оборудования. А поскольку в хвосты уходила практически вся поступающая на переработку руда (урана в ней в среднем было <1%), то ежегодно требовалось отчуждение прилегающих к заводу территорий для хвостохранилищ.

Производительность мельниц самоизмельчения существенно возрастает при догрузке в них мелющих металлических шаров. Мельницы «Каскад» большого диаметра и обычные шаровые мельницы работают в замкнутом цикле со спиральными классификаторами. Сливы классификаторов подвергаются контрольному гидроциклонированию, пески возвращаются в шаровую мельницу.

Как уже отмечалось, для силикатных и алюмосиликатных руд основным является метод выщелачивания раствором серной кислоты с окислителями. Выщелачивание руд с высоким содержанием кислото-емких компонентов (карбонатов) проводят растворами карбоната и бикарбоната натрия. При этом минералы 4-валентного урана окисляют в карбонатном растворе наиболее дешевым окислителем – кислородом воздуха.

Перспективным способом извлечения урана из упорных руд является автоклавное выщелачивание при повышенных температурах,

* Впоследствии работал главным инженером завода № 12 в г. Электростали, заместителем главного инженера 16 ГУ, заместителем начальника НТУ Миллеровского завода.

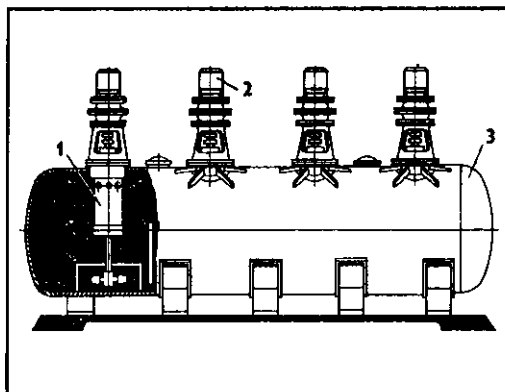


Рис. 32.
Автоклав
с механическим
перемешиванием пульпы:
1 – аэрирующее
и перемешивающее
устройство;
2 – привод перемешивающего
устройства;
3 – корпус автоклава

увеличивающих скорость протекания полезных реакций. Использование в автоклавах кислорода или воздуха в качестве окислителя позволило совместить процессы выщелачивания урана и получения серной кислоты за счет окисления пирита, присутствующего в руде, а также окислить сульфиды других ценных металлов с переводом их в раствор. Кислород или воздух как окислители весьма доступны, и при их применении в продуктах отсутствуют вредные газообразные и растворенные вещества, загрязняющие окружающую среду. Использование процессов автоклавного выщелачивания повышает уровень извлечения урана, экономит химикаты, сокращает энергетические затраты (пар, сжатый воздух). Использование процесса кислотного автоклавного выщелачивания облегчило создание замкнутой технологической схемы переработки руды.

На рис. 32 показан разработанный в СССР серийно изготавливаемый и успешно применяемый в промышленности четырехкамерный автоклав с механическими перемешивающими устройствами. Кроме горизонтальных автоклавов применяются и вертикальные. Последние с пневматическим перемешиванием пульпы объемом 100–200 м³ рассчитаны на работу при повышенных температурах и давлениях [129].

Гидрометаллургический цикл переработки урановых руд включает процесс сорбционного извлечения урана из пульпы с последующей экстракционной очисткой урановых растворов. В первые годы добычи урановой руды для получения урана в оборонных целях извлечением побочных продуктов, содержащихся в рудах, просто не занимались. Позднее комплексная переработка урановых руд и извлечение побочных продуктов нашли широкое применение.

В отрасли основным институтом – разработчиком комплексного извлечения из руд ценных продуктов был ВНИИХТ. Среди ученых этого института особенно следует отметить А.П.Зефирова, Б.В.Не-

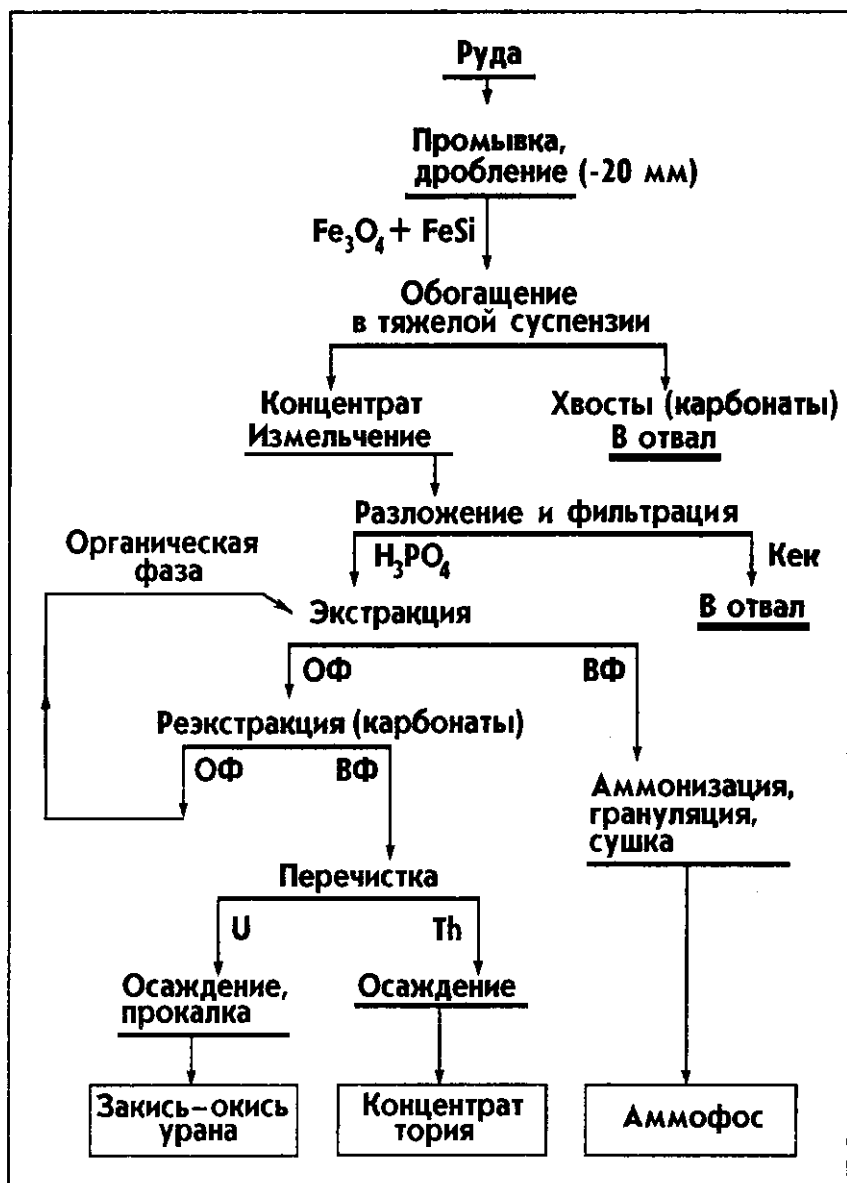


Рис. 33. Технологическая схема переработки урано-фосфорно-ториевых руд:
ОФ и ВФ – органическая и водная фазы



**БОРИС
НИКОЛАЕВИЧ
ЛАСКОРИН** —
академик с 1976 г.
Создал основы
сорбционной и
экстракционной
технологии

вского и Б.Н.Ласкорина*. Под их руководством была реализованна комплексная схема получения из урано-фосфорно-ториевых руд не только закиси-окиси урана (U_3O_8), но и концентратов тория, а также удобрения — аммофоса (рис. 33). На этой схеме дробления руды в тяжелой суспензии, состоящей из смеси Fe_3O_4 и $FeSi$, минералы урана и тория осаждаются, а более легкие, включая и пустую породу, остаются наверху. Полученный концентрат вскрывают серной кислотой. После фильтрации на карусельных фильтрах из фосфорной кислоты экстракцией извлекают уран, а рафинат аммонизируют, упаривают, гранулируют и сушат, получая азотно-фосфорное удобрение — аммофос. При экстракции содержащиеся в концентрате другие продукты при разложении переходят в раствор и накапливаются в органической и водной фазах. Из фосфорной кислоты экстрагируют уран и торий, которые потом разделяют при реэкстракции. Урановый реэкстракт подвергают дополнительной экстракционной очистке с получением кристаллов аммоний-уранилтрикарбоната, который затем прокаливают до закиси-окиси урана ядерной чистоты. Из ториевого реэкстракта осаждают концентрат тория, который хранят для последующей переработки.

Впервые в мире из бедных, непромышленных руд сложного состава были извлечены уран и все сопутствующие ценные компоненты с одновременной утилизацией попутно получаемых азотно-фосфорных удобрений. При этом реализация попутно получаемых продуктов примерно в 2 раза снижает себестоимость урана [132]. При промышленной реализации разработанных схем исключается

* До 1952 г. работал в институтах химической промышленности, а затем во ВНИИХТс. Лауреат Ленинской и Государственной премий.

загрязнение окружающей среды жидкими отходами, так как технологические растворы упариваются досуха с получением удобрений. Образующийся в результате взаимодействия серной кислоты с рудой гипс, направляемый в хвостохранилище, связывает основную массу радиоактивных элементов (радия). Под руководством академика Б.Н.Ласкорина учеными ВНИИХТа со многими соисполнителями были также разработаны и реализованы на горно-металлургических предприятиях схемы комплексной переработки других руд. В работе [133] подробно рассмотрены схемы попутного извлечения с ураном редкоземельных элементов и молибдена. Приведены данные о выделении молибдена различными сорбентами из сернокислотных сред. Без комплексной переработки таких бедных ураном руд извлечение урана является совершенно не экономичным. В то же время разработка сорбционно-экстракционных процессов не только способствовала выделению редкоземельных и других элементов, применяемых в народном хозяйстве (скандий, медь и др.), но и позволила отрасли создать на ряде месторождений предприятия по выделению золота и других материалов.

Загрязненность территорий и охрана окружающей среды в уранодобывающей промышленности

При добыче и переработке радиоактивных руд неизбежны нарушения окружающей среды и дополнительное воздействие продуктов распада изотопов урана и тория на растительный и животный мир. ^{235}U , ^{238}U , ^{232}Th являются родоначальниками трех радиоактивных семейств.

В основном радиоактивном семействе ^{238}U после 5 последовательных распадов образуется ^{226}Ra (период полураспада $T_{1/2} \sim 1600$ лет), который непрерывно превращается в ^{222}Rn ($T_{1/2} = 3,8$ сут). Короткоживущий ^{222}Rn , последовательно распадаясь на другие радиоактивные элементы, превращается сначала в долгоживущий ^{210}Pb ($T_{1/2} = 21$ год), а затем переходит в ^{210}Bi и в стабильный изотоп ^{206}Pb . При всех (почти 20) последовательных распадах от ^{238}U до ^{206}Pb происходит испускание не только α - и β -излучений, но и γ -квантов.

Другой родоначальник радиоактивного семейства ^{235}U после нескольких последовательных превращений переходит в долгоживущий ^{227}Ac ($T_{1/2} = 21,6$ года). В этом семействе ^{223}Ra имеет $T_{1/2} = 11,7$ сут, а ^{219}Rn — 4 с. Всего лишь 7 последующих распадов позволяют ^{227}Ac превратиться в стабильный изотоп ^{207}Pb . У ^{232}Th долгоживущим дочерним продуктом является ^{228}Th ($T_{1/2} = 5,8$ года), а продукт его распада ^{224}Ra имеет $T_{1/2} = 3,64$ сут и, последовательно распадаясь, превращается в стабильный изотоп ^{206}Pb . Поэтому на

подземных урановых рудниках, в карьерах и на прилегающих к ним территориях из-за наличия вышеуказанных продуктов радиоактивного распада радиационный фон повышен в несколько раз по сравнению с естественным. Если же неудовлетворительно осуществляется вентиляция, то содержание в воздухе газообразных радиоактивных продуктов (в основном изотопов радона) и аэрозолей может оказаться в забоях шахт и других помещениях рудников недопустимо большим.

На промплощадках урановых рудников из-за близости вентиляционных шахт концентрация радона более чем в 10 раз превышает его содержание в окружающей среде [135]. Однако источником загрязнения атмосферного воздуха, а также территории в районе гидрометаллургических заводов и урановых рудников являются аэрозольные выбросы. По данным Института биофизики Минздрава СССР, вблизи основных цехов на промплощадке из-за поступления рудной пыли, конденсатов паров и других аэрозолей плотность радиоактивных выпадений может достигать до 10^{-9} Ки/(м²·сут) по суммарной α -активности [135]. Обычно эти промплощадки небольшие и характеризуются малой высотой (10–12 м) выбросов в атмосферу. С пылью и аэрозолями в окружающую среду выбрасываются и основные продукты уранодобывающей промышленности: уран и радий. Однако преобладает в выбросах α -активность урана (табл. 33).

Таблица 33

Соотношение α -активности урана и радия в оседающей пыли на различных расстояниях от гидрометаллургических заводов (средние данные по зонам) [135]

Завод*	На промплощадке	Расстояние от промплощадки, км				
		0,3	0,3–0,6	0,6–0,9	0,9–1,2	1,2–1,5
ГМЗ-1	3,4	2,6	1,7	1,4	1,3	1,2
ГМЗ-2	18,0	10,0	6,5	3,7	3,4	2,8

* На ГМЗ-1 получали только U_3O_8 , а на ГМЗ-2 – металлический уран.

Установлены соотношения усвояемости радия и урана растительностью: количество радия в растительности составляет $\leq 1,2\%$ по отношению к его содержанию в почве, а количество урана может достигать 20–25% (в единицах радиоактивности) (рис. 34).

Помимо радиоактивных элементов, входящих в ряды ^{238}U , ^{235}U и ^{232}Th , слабой природной радиоактивностью обладают и другие элементы (^{40}K , ^{129}I , ^{244}Pu и др.). Однако основным источником естественного радиационного фона или ионизирующих излучений, связанных с радионуклидами, являются элементы радиоактивного ряда ^{238}U , а из них – ^{226}Ra и ^{222}Rn .

Несмотря на высокую степень рассеяния урана, а следовательно, и продуктов его распада по земным сферам (атмосфере, гидросфере, литосфере), выравнивания его концентраций в породах и почвах не бывает. Это обуслов-

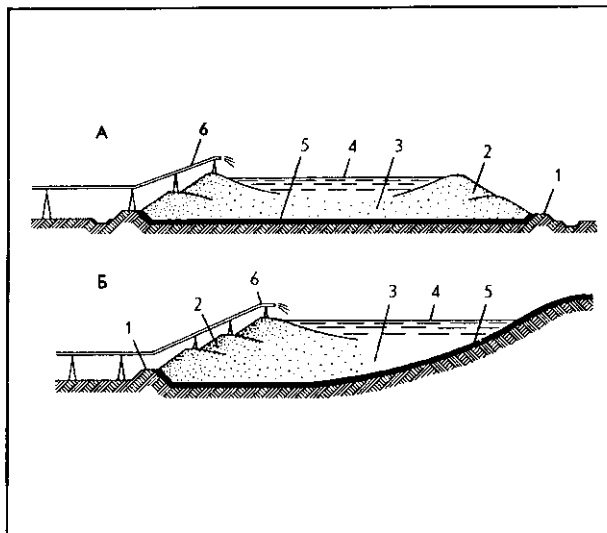


Рис. 36.
Устройство
и основные
элементы
намываемых
хвостохранилищ:
А, Б – равнинное и
овражно-балочное
хвостохранилища
соответственно;
1 – пионерная
дамба,
2 – намывная дамба
(песковая фракция
хвостов),
3 – иловая
фракция хвостов,
4 – зеркало
отстойного
пруда
хвостохранилища,
5 – водоупорный
экран,
6 – пульнопровод

зону, зоны первичного и вторичного воздействия и область вне зоны воздействия.

В некоторых районах Земли радиоактивные элементы в значительных концентрациях скапливаются у самой земной поверхности и, как правило, в местах таких скоплений отмечается наиболее высокий естественный фон ионизирующих излучений. Существуют значительные территории, на которых радиационный фон в 10, а то и в 20 раз превышает средний по Земле. Это – прибрежные россыпи тяжелых песков, имеющих промышленные концентрации монацита, содержащего до 10% тория и меньшее количество урана. Такими россыпями заняты большие площади (десятки и сотни квадратных километров) на побережьях Индии, Бразилии, Австралии и на меньших площадях в других регионах.

Источниками загрязнения окружающей среды в урановых карьерах служат все карьерное пространство и прилегающие участки земли, на которых складываются руды, отсыпаются радиоактивные пустые породы и образуются аэрозоли и пыль. Карьерные воды, несущие соединения урана, радия и других радиоактивных и тяжелых металлов, загрязняют почву и водоисточники. Уран и радий содержатся также в шахтных водах и сточных водах спецпрачечных и душевых. Определенную опасность создают также продукты распада радия и радона ^{210}Po и ^{210}Pb .

Неотъемлемой частью уранодобывающей промышленности являются хвостохранилища. В ходе технологических процессов образуются сбросы – хвосты, состоящие из твердой и жидкой фаз.

Количество твердых отходов примерно соответствует количеству перерабатываемой руды, жидких же отходов в 2–3 раза больше. Тип хвостохранилища зависит от места расположения рудника и гидрометаллургического завода.

Равнинное хвостохранилище обычно имеет ограждающую дамбу из отвальных песков по всему периметру, а овражно-балочные — лишь со стороны понижения рельефа. Наиболее распространенными являются намывные хвостохранилища, когда ограждающая дамба наращивается путем намыва хвостовой пульпы, перекачиваемой с завода по пульпопроводу (рис. 36). На насыпных хвостохранилищах ограждающая дамба отсыпается из твердой, преимущественно песковой, фракции хвостов, а иловая фракция вместе с хвостовыми водами отдельно попадает по пульпопроводу в образующуюся чашу. Налив-

Таблица 34

Характерные параметры изоляции рекультивируемых объектов от окружающей среды [137]

Показатель	Отвалы шахт и карьеров			Хвостохранилища гидрометаллургических заводов
	Пустые (вмещающие) породы	Хвосты радиометрического обогащения	Забалансовые руды	
Содержание урана, %	0,001–0,006	0,010–0,020	0,010–0,030	0,001–0,011
Суммарная α -активность пород, Бк/кг	$1,4 \cdot 10^3$ – $4,4 \cdot 10^3$	$3 \cdot 10^3$ – 10^4	$3 \cdot 10^3$ – $1,3 \cdot 10^4$	$1,03 \cdot 10^4$ – $4,9 \cdot 10^5$
Плотность потока радона с поверхности, Бк/(м ² ·с)	0,034–0,094	0,08–0,8	0,12–1,2	0,2–30
Содержание ²²⁶ Ra в породах, Бк/кг	37–220	300–550	300–1700	5000*
γ -Активность пород, мкР/ч	20–120	40–250	50–200	100–1400
Ориентировочная толщина рекультивационного слоя, необходимого для изоляции отходов от окружающей среды, м	1–1,5	1,5–2,0	1,2–1,6	2,5–3,0

* Среднее значение (разброс от 1100 до 28000). При указанных толщинах слоя рекультивации «ликвидируемых» отходов на поверхности закрытых группом радиоактивных объектов остаточное излучение не будет превышать допустимого — 0,2 Бк/(м²·с). Этот вид защиты окружающей среды и является главным как у нас в стране, так и за рубежом.

ными называют такие хвостохранилища, когда хвостовая пульпа закачивается (наливается) в бессточное естественное или искусственное понижение рельефа (например, в отработанный карьер).

Особенности устройства хвостохранилищ существенно влияют на степень и характер радиоактивного загрязнения окружающей среды [135]. Как источник загрязнения хвостохранилище имеет характерные особенности, отличающие его от других производственных источников загрязнения. Прежде всего — это приземный источник неорганизованного поступления радиоактивных аэрозолей, имеющий сравнительно большую открытую поверхность (десятки и сотни тысяч квадратных метров), сложенную мелкодисперсным пылящим материалом (пески, илы). Поэтому режим эксплуатации хвостохранилищ предусматривает мероприятия по сокращению площадей пылящих поверхностей (откосы ограждающих дамб, высохшие поверхности и т.д.). Для сравнения в табл. 34 приведены данные, характеризующие радиационное воздействие на окружающую среду различных отходов уранодобывающей промышленности.

Следует отметить, что усилия, предпринятые по обеспечению программы № 1 природным ураном, гарантировали создание ядерного щита нашей Родины и создали все условия для успешного развития ядерной энергетики как в России, так и в других странах ближнего зарубежья. Достаточно отметить, что в мире в число 10 крупнейших поставщиков урановых концентратов в 1992 г. входили Казахстан, Россия и Узбекистан. Ими было произведено соответственно 2500, 2200 и 2070 т урана, что составило около 20% мирового производства урана [138]. Как известно, в настоящее время потребность в природном уране сильно снизилась. Не нужно полчать новый плутоний и высокообогащенный уран для ядерного оружия. Использование же накопленных запасов ^{235}U , плутония, изделий из них и обедненного урана (отвала), хранящегося на заводах по обогащению урана, позволяет не только резко сократить, но и в 1995–2000 гг. даже полностью прекратить добычу урана [139]. В работе [139] отмечается, что с 1938 по 1993 г. в мире добыто 1,7–1,8 млн. т урана. Большая его часть находится в отвалах диффузионных заводов с содержанием ^{235}U примерно 0,3%. Углубление отвала эквивалентно дополнительному вовлечению в ядерную энергетику 500–600 тыс. т природного урана, а при использовании оружейных делящихся материалов нет необходимости и после 2010 г. повышать существующую сейчас добычу урана.



Первый завод по получению изделий из металлического урана и других материалов для использования в атомной промышленности

Для опытного реактора Ф-1 и первого промышленного уран-графитового реактора необходимо было получить в течение 1946–1947 гг. около 200 т металлического урана, из них примерно 150 т в виде цилиндрических блоков диаметром 35 мм и высотой 100 мм должны были быть герметично очехлованы алюминиевой оболочкой. Предприятием, которое впервые освоило промышленную технологию получения металлического урана и изделий из него, был завод № 12. Завод стал пионером промышленного освоения производства урановых блоков — исходных изделий, в которых в Челябинске-40 на ядерных реакторах начиная с 1948 г. начали нарабатывать плутоний для ядерного оружия. Без усилий завода № 12 не была бы в установленные сроки получена другая ядерная взрывчатка — высокообогащенный ^{235}U (на комбинате № 813 в Свердловске-44).

Завод № 12 стоял у истоков создания не только ядерного, но и термоядерного оружия, разрабатывая дисперсионные блоки из обогащенного урана, а также технологию производства лития. Именно литий и получаемый из него при облучении нейтронами тритий являются основными материалами, без которых невозможно создать эффективное термоядерное оружие.

К 1945 г. завод № 12 уже имел 30-летнюю историю работы по выпуску оборонной продукции. Поэтому будет уместно напомнить читателю, что завод был основан промышленником Н.А. Второвым в 1915 г. в подмосковном поселке Затишье, выросшем потом в современный г. Электросталь. На базе этого мелкого предприятия в 1919 г. был организован Богородский казенный снаряжательный завод. Принадлежность завода до 1945 г. неоднократно изменялась: в 1928 г. он входил в Военно-химический трест и назывался Богородским снаряжательным заводом (№ 12), в 1937 г. был в составе Наркомата оборонной промышленности, а затем и других наркоматов. В 1941–1946 гг. директором завода был генерал-майор С.А. Неструев, главным инженером в 1944–1945 гг. работал С.И. Золотуха, а затем по



**АНАТОЛИЙ
НАЗАРОВИЧ
КАЛЛИСТОВ —**

директор
завода № 12
с 1946 по 1951 г.
и с 1956 по 1959 г.

март 1946 г. — Ю.Н. Голованов. В начале 1946 г. директором был назначен А.Н. Каллистов, а главным инженером — Ф.М. Бреховских, который в 1948 г. был переведен для работы на комбинат № 817. На заводе была введена должность главного металлурга, им был назначен Ю.Н. Голованов. А.Н. Каллистов работал директором с 28 февраля 1946 г. по 2 октября 1951 г., а затем с 11 октября 1956 г. по 10 февраля 1959 г.* (с 1951 по 1956 г. директорами были Ю.Н. Голованов, а затем С.И. Золотуха).

С передачей завода № 12 в ПГУ сразу же началась его реконструкция. Это было необходимо, потому что завод уже в начале 1946 г. получил совершенно секретное задание в кратчайший срок обеспечить в необходимых количествах переработку урановых руд для получения диоксида, а затем закиси-окиси урана [140]: «Была поставлена задача, чтобы на металлургическом переделе в результате восстановительных плавов закиси-окиси урана с металлическим кальцием мы получили металлический уран в виде стержней, которые после механической обработки и резки на блочки герметизировать в алюминиевые оболочки». Выполнение такого задания в период, когда действовали законы военного времени, потребовало не только модернизации многих цехов и участков, но и привлечения для работы на заводе новых специалистов. Уже в первом квартале 1946 г. заводу № 12 было передано 2 млн. руб. на капитальное строительство.

Реконструкции завода предшествовали работы научно-исследовательских организаций, которые смогли разработать технологические процессы, обеспечивающие перестройку завода № 12 на нужды атомной промышленности.

* С 1951 по 1956 г. А.Н. Каллистов был директором завода № 250, который создавался в Новосибирске.

Вклад Гиредмета и НИИ-9 в создание атомной промышленности

Эти институты были пионерами в разработке технологических процессов, которые реализовывались на заводе № 12.

Государственный институт редких металлов Наркомцветмета был образован в Москве в 1931 г. Практически одновременно с лабораторией № 2 в 1943 г. институт приступил к работам по программе № 1. Директором Гиредмета работал А.П. Зефилов*, а его заместителем по научной работе — Н.П. Сажин (академик с 1964 г.). В 1943 г. Гиредмету было поручено возобновить прекращенную ранее деятельность урано-радиевой лаборатории с включением ее исследований в план первоочередных работ.

Финансирование работ Гиредмета по решению проблем получения урана осуществлялось непосредственно 9 Управлением НКВД (руководитель А.П. Завенягин, заместитель — А.Д. Зверев). Гиредмету было поручено:

- **усовершенствование** технологии получения урана из руд;
- **получение** тетрафторида урана;
- **получение** карбида урана;
- **получение** металлического урана;
- **разработка** и изготовление различных урановых мишеней для проведения физических исследований при облучении их нейтронами;
- **получение** различных препаратов из продуктов распада урана.

В начале 1944 г. в институте впервые в СССР был получен карбид урана. Порциями по 10 кг заместитель директо-



**ЮРИЙ
НИКОЛАЕВИЧ
ГОЛОВАНОВ
(1911–1972) —**

*главный инженер,
главный металлург,
а затем директор
завода № 12*

* Впоследствии был переведен членом Коллегии ВГУ, работал начальником НТУ Минска, а затем директором ВНИИХТа, член-корреспондент АН СССР с 1946 г.



САВВА
ИВАНОВИЧ
ЗОЛОТУХА
(1913–1990) —
главный технолог
завода № 12 с 1946 г.,
а затем
его директор

ра Н.П. Сажин и З.В. Ершова этот материал лично передавали И.В. Курчатову и В.В. Гончарову в лабораторию № 2 для исследований и подготовки к использованию в строящемся опытном реакторе Ф-1 [24]. Разработчиками первой опытной технологии получения металлического урана кроме научного руководителя Н.П. Сажина являются З.В. Ершова, Г.Е. Каплан, Г.М. Комовский, Ю.А. Чернихов, Е.А. Каменская и др. На процессе получения первого слитка металлического урана (опыт закончился в 2 ч ночи) присутствовали заместитель председателя Совнаркома М.Г. Первухин и заместитель наркома внутренних дел А.П. Завенягин и будущий руководитель 2 Управления ПГУ генерал-майор С.Е. Егоров. Так что еще до создания Специального комитета, возглавляемого Л.П. Берией, и ПГУ М.Г. Первухин не только организовывал работы по программе создания ядерного оружия, но и формировал в наркоматах, институтах и на заводах соответствующие коллективы для работ по созданию этого оружия. Вместе с научным руководителем проблемы И.В. Курчатовым и А.П. Завенягиным он стоял у истоков разработки и испытания первых атомных бомб из полученных на отечественных предприятиях плутония и ^{235}U , а также создания первой термоядерной бомбы. Под его руководством начиналась организация производства дейтерия и лития на заводах химической промышленности и трития в ПГУ.

Основными изделиями и исходными материалами для ядерного оружия были урановые блоки для ядерных реакторов и диффузионные фильтры для оборудования по производству обогащенного ^{235}U .

Получение металлического урана советскими учеными показало готовность отечественных специалистов создать

производство урана и приступить к выполнению атомной программы. Для этой цели на заводе № 12 была создана опытная установка, на которой в 1945 г. проводились полупромышленные опыты получения слитков урана массой в несколько килограммов. Эти работы выполнялись под руководством бригады Гиредмета во главе с З.В. Ершовой. В составе бригады работали Н.П. Солдатов, Т.С. Меньшикова и др. Начальником опытного цеха завода № 12 тогда работал Н.С. Козлов. В Гиредмете кроме лаборатории З.В. Ершовой над получением металлического урана работала и электрохимическая лаборатория, возглавляемая С.И. Склярченко и Г.Е. Каплан. О направленности работ Гиредмета в 1944–1945 гг. можно судить по названиям выпускаемых отчетов: «Электролитическое выделение урана», «Получение металлического урана электролизом расплавленных солей».

В тематику Гиредмета были включены и работы по получению тория. В институте создаются новые лаборатории, которые требуют дополнительных помещений. Под руководством профессора Г.Ф. Комовского в институте был налажен рентгеноструктурный и спектральный анализ. Профессор Ю.Ф. Черников создал химико-аналитическую лабораторию, профессор Г.Ф. Меерсон — лабораторию карбидов урана.

В 1944 г. велись работы по получению диоксида урана, а также вакуумной рафинировке металлического урана. Непрерывно возрастающий объем работ Гиредмета по урану и инициатива З.В. Ершовой, изложенная в ее докладной записке А.П. Завенягину о необходимости создания специального института, ускорили создание в системе НКВД в ноябре 1944 г. НИИ-9 во главе с В.Б. Шевченко.



**АЛЕКСЕЙ
ПЕТРОВИЧ
ЗЕФИРОВ**
(1907–1979) —
директор Гиредмета
с 1943 по 1946 г.



**ВИКТОР
БОРИСОВИЧ
ШЕВЧЕНКО**
(1906–1981) —
директор НИИ-9
с 1945 по 1952 г.

В 1945 г. НИИ-9 была передана тематика Гиредмета по работам с ураном. Бывшие сотрудники Гиредмета З.В. Ершова, В.Д. Никольский и Н.С. Повицкий составили технические задания на проектирование лабораторных помещений НИИ-9, а также цехов по переработке урановой руды, получению тетрафторида урана и металлического урана на заводе № 12. Проектное задание на строительство зданий для НИИ-9 было выполнено в 1945 г. и передано на заключение академику В.Г. Хлопину, который в довоенные годы был научным консультантом Гиредмета по проблемам получения из руд урана и радия.

Перед НИИ-9 были поставлены следующие задачи:

- **изучение** месторождений урана, систематизация данных и создание минералогического музея;
- **разработка** методик геолого-разведочных работ по урану и методов добычи урановых руд;
- **создание** технологических процессов переработки руд урана от стадии дробления до получения чистых солей урана;
- **разработка** технологии получения металлического урана;
- **проверка** технологического процесса выделения плутония из облученного в ядерных реакторах урана и процессов получения металлического плутония и изделий из него.

Без творческой инициативы дирекции НИИ-9 выполнять все поставленные задачи было невозможно. Как казус, вспоминают ветераны, что за проявленную инициативу при работе с облученным в реакторе Ф-1 ураном, директор института В.Б. Шевченко получил вместо благодарности выговор. При проведении

первых радиохимических работ на установке № 5 по выделению и очистке плутония, наработанного в урановых блоках, из реактора Ф-1 в НИИ-9 были получены низкие выходы плутония и плохая очистка от продуктов деления. На эти эксперименты не были приглашены авторы радиохимической технологии из РИАНа. Поэтому к экспериментам на установке № 5 во втором туре исследований были активно привлечены кроме ученых РИАНа и другие сотрудники академических институтов [38].

В начале 1945 г. НИИ-9 поручалось также вести работы по созданию разделения изотопов урана методом центрифугирования. Для этих целей создается специальная лаборатория под руководством профессора Ф.Ф. Ланге. Эта лаборатория лишь формально входила в состав НИИ-9, а работала по планам, утверждаемым в ПГУ.

Перед НИИ-9 были поставлены и другие задачи, включая проблемы, связанные с получением тяжелой воды, и т.д.

Академик В.Г. Хлопин внимательно рассмотрел техническое задание на строительство зданий и перечень научных проблем, поставленных перед новым институтом. Он был удивлен большим количеством задач, но в целом дал положительное заключение.

Необходимо отметить, что целый ряд задач тогда уже решался по поручениям ГКО, 9 Управления НКВД и ПГУ другими институтами Академии наук, а также НИИ и КБ различных наркоматов. Так, РИАН был головным по созданию технологии радиохимического завода выделения плутония, НИИ-42 Наркомхимпрома отвечал за получение тетрафторида урана, ГЕОХИ — за химико-аналитический контроль, ЛИПАН — за создание промышленного ядерного реактора и получение ^{235}U . В МГУ им. М.В. Ломоносова на кафедре неорганической химии под руководством профессоров В.И. Спицина и В.В. Фомина исследовались различные соединения урана. Однако основная часть работ в интересах создания технологических процессов на заводе № 12 решалась лабораториями НИИ-9. Объем строительно-монтажных работ по созданию экспериментальной базы НИИ-9 на первый квартал 1946 г. был утвержден на сумму 4 млн. руб.

В апреле 1944 г. В.Б. Шевченко и представитель лаборатории № 2 И.Н. Головин были командированы в освобожденную нашими войсками Австрию (в Институт радия) для выяснения возможности изъятия оборудования и различных химических реагентов. В Германию были направлены также несколько комиссий, в которые входили А.П. Завенягин, В.Б. Шевченко, В.В. Гончаров, И.К. Кишин, Ю.Б. Харитон и др. Комиссии выясняли возможность эвакуации из Германии не только имеющегося там природного урана

в виде его солей и урановой руды, но и различных приборов, установок и оборудования. Существовала комиссия и по приглашению для работы по договорам на наших предприятиях немецких ученых и квалифицированных специалистов [89].

Директор НИИ-9 В.Б. Шевченко с участием переведенных из Гиредмета специалистов З.В. Ершовой, В.Д. Никольского и работников отдела кадров ПГУ укомплектовывал институт научными сотрудниками, формировал коллективы лабораторий, отделов, опытных установок. Первыми научными работниками, принятыми в институт, были кандидаты наук Е.К. Грачева, В.К. Марков, И.А. Миркин и член-корреспондент АН СССР Н.А. Изгарышев, крупнейший специалист по электрохимии и коррозии.

Руководство ПГУ и лично А.П. Завенягин уделяли большое внимание развитию НИИ-9, формированию его тематики, укреплению кадрами и экспериментальной базой. Так, уже 17 января 1946 г. и 8 февраля 1946 г. горно-металлургическая секция Инженерно-технического совета, рассмотрела главные вопросы, которые необходимо было решать в НИИ-9, на заводе № 12 и уранодобывающих предприятиях. В работе секции участвовали немецкие специалисты доктора наук Н. Риль и Г. Вирц, которые в качестве экспертов вместе с главным инженером завода № 12 Ю.Н. Головановым давали заключение по проекту реконструкции цехов завода. Рассматривая проекты цехов обогащения (№ 1), очистки (№ 2) и цеха получения металлического урана (№ 3), секция приняла решения, охватывающие научные исследования НИИ-9 не только по заводу № 12. Были даны следующие конкретные поручения:

- предусмотреть в цехе № 2 получение диоксида урана, не нарушая схемы аппаратурного оформления цеха. Восстановление от закиси-окиси до диоксида урана проводить в отдельном здании;
- разработать процесс извлечения радия из получаемых в цехе № 1 сырых сульфатов и радиевых концентратов; к разработке привлечь Ухтинский комбинат НКВД;
- технологические схемы по цехам завода № 12 и процент извлечения продукта обсудить в 10-дневный срок с академиком В.Г. Хлопиным и немецкими учеными докторами Н. Рилем и Г. Виртцем, а также с В.И. Спицыным, В.Б. Шевченко, Н.Ф. Квасковым*, Н.П. Сажиним, О.Е. Звягинцевым и др.;

* Крупнейший специалист и организатор производства редких металлов и атомной промышленности. В 1938–1945 гг. работал главным инженером и начальником Управления свинцово-цинковой промышленности Наркомцветмета, с 1945 г. — в ПГУ, сначала главным инженером, а затем заместителем начальника 2 Управления, в 1949–1953 гг. — начальник 1 Управления в ПГУ, в 1953–1974 гг. — начальник 3 ГУ Минсредмаша.

- директору НИИ-9 В.Б. Шевченко проверить в трехмесячный срок в лабораториях института все технологические схемы на заводе № 12;
 - Гипроредмету (П.Е. Бельскому) в составе очистных установок производственных стоков предусмотреть специальные фильтры для улавливания урана из сточных вод.
- Одновременно были даны поручения и приняты такие решения:
- В.Б. Шевченко изучить возможность извлечения из сланцев урана, молибдена, никеля и ванадия;
 - составить до 1 мая 1946 г. проект работ по эксплуатации штольни и опытного завода в районе Сака-Силляме с учетом проектного задания, выполненного ВИМС. Установить производительность опытного завода по дроблению, измельчению и обжигу 100 т сланцев в сутки;
 - просить Совнарком СССР передать опытную установку № 3 Московского завода им. П.Л. Войкова Наркомцветмета в состав ПГУ для полупромышленных испытаний технологий извлечения урана из сланцев.

Из изложенного очевиден громадный объем работ, который выполнялся НИИ-9 уже в 1946 г. С института не только спрашивали, но и сильно ему помогали. Так, в начале года установка № 3 была передана в институт и стала опытным заводом НИИ-9*. Первым начальником установки № 3 был Н.С. Богомолов, которого затем сменил А.А. Матвеев. К середине 1946 г. численный состав НИИ-9 составлял примерно 1200 чел. В институте имелись 13 лабораторий, проектно-конструкторский отдел с его ленинградским филиалом, а также необходимые технические службы. Для работ немецкого профессора М. Фольмера по получению тяжелой воды было сформировано специальное конструкторское бюро. Впоследствии тематика НИИ-9 уточнялась.

Для отработки технологии на строящемся радиохимическом заводе комбината № 817 в НИИ-9, как отмечалось, была создана специальная установка № 5, на которой сотрудники НИИ-9, РИАНа, ИОНХа, ИФХАНа, ЛИПАНа и других привлеченных организаций под научным руководством члена-корреспондента АН СССР заместителя директора РИАНа Б.А. Никитина отрабатывали технологию системы контроля и оборудование при выделении плутония из облученных в ядерных реакторах урановых блоков. Как отмечает ветеран НИИ-9 М.Е. Пожарская, первым начальником установки, которая была в составе лаборатории З.В. Ершовой, был П.И. Точный, а после его перевода на комбинат № 817 директором радиохимического завода.

* Впоследствии установка вместе с рядом лабораторий НИИ-9 по добыче и переработке урановых руд была передана в НИИ-10, директором которого после А.П. Зесфирова работает Д.И. Скорыхов.

мического завода, руководителями установки были сначала М.А. Белокурова, а затем М.В. Угрюмов. Под руководством З.В. Ершовой и В.Д. Никольского в НИИ-9 из исходных растворов, полученных на установке № 5, 18 декабря 1947 г. впервые в СССР был выделен первый препарат трехвалентного плутония массой 73 мкг. Это была капелька светло-голубого цвета в миллиметровой пробирке [38]. В первом полугодии 1948 г. на установке были получены две «крупные» партии концентратов плутония, содержащие 1207 и 2649 мкг плутония. Из указанного количества для проведения исследовательских работ в других институтах тогда же были переданы: в лабораторию № 2 73 мкг, ИОНХ 44 мкг, РИАН 34 мкг. С основными количествами плутония работали соответствующие лаборатории НИИ-9 (группы В.Д. Никольского, В.С. Соколова, Я.М. Стерлина). В группе Я.М. Стерлина был получен первый металлический плутоний (а его свойства изучались в лаборатории А.С. Займовского). К концу 1948 г. в НИИ-9 уже работали примерно с 300 мг плутония, концентраты которого были получены на установке № 5. Это дало возможность приступить к работе для окончательной проверки схемы аффинажа плутония, предложенной и разработанной академиком И.И. Черняевым и его сотрудниками [38].

Среди крупнейших ученых, работавших в НИИ-9, необходимо назвать члена-корреспондента АН СССР С.Т. Конобеевского, который с 1948 г. был переведен из МГУ им. М.В. Ломоносова для руководства группой рентгеноструктурного анализа. Он первым начал изучать диаграммы состояний сплавов урана и плутония. В 1952 г. распоряжением Совета Министров С.Т. Конобеевский был назначен заместителем директора НИИ-9 по научной работе. Сергей Тихонович по праву считается создателем отечественной школы радиационного материаловедения. С 1 декабря 1952 г. директором ВНИИНМа назначается академик А.А. Бочвар, а первым заместителем директора — профессор В.В. Фомин из МГУ.

Реконструкция завода № 12

Завод № 12 был относительно крупным предприятием, имеющим в своем составе более 4,5 тыс. работающих. На территории завода находилось более сотни мелких зданий площадью 150–500 м², в которых размещались различные цеха и участки, приспособленные для снаряжения традиционных боеприпасов. Изменение профиля завода, разработка новых технологических процессов привели к необходимости создания на заводе специальной строительной организации и подразделений главного металлурга и главного технолога.

Для реконструкции и строительства новых цехов завода приказом начальника Главпромстроя А.Н. Комаровского в марте 1946 г. на-

чальником Управления строительства НКВД назначается опытный военный строитель инженер-полковник Н.Н. Волгин. В своих воспоминаниях, освещая многочисленные эпизоды работы как в военный период, так и на стройках Главпромстроя НКВД СССР, ветеран-строитель Н.Н. Волгин перечисляет, кроме завода № 12, и другие объекты, которые создавались с его участием в атомной промышленности [141]. На заводе № 12 главным инженером Управления строительства был назначен В.П. Нарбеков. Реконструкцию и строительство завода вели не только вольнонаемные, военные строители, но и спецконтингент — заключенные. Реконструкция завода была под постоянным контролем А.П. Завенягина, по указанию которого были построены и специальные финские домики — коттеджи для проживания немецких специалистов, имеющих опыт работы с металлическим ураном. На завод приезжал Л.П. Берия, которому Н.Н. Волгин докладывал о своей работе.

В июле 1949 г. Н.Н. Волгин приказом МВД СССР был назначен первым заместителем начальника Главпромстроя, а с 1953 по 1974 г. после организации Минсредмаша и реорганизации работ начальником 10 Строительного управления, которое в начальный период называлось Первым главным строительным управлением Минсредмаша. Стройки, которые входили в состав этого главка, размещались на Урале и в Сибири и имели основного заказчика в лице А.Д. Зверева — начальника 4 ГУ. Несколько предприятий главков, которыми руководили тогда Н.И. Павлов и Н.Б. Карпов, также строились под руководством 10 ГУ. Под руководством Н.Н. Волгина осуществлялось строительство объектов и в других отраслях промышленности,



**НИКОЛАЙ
НИКОЛАЕВИЧ
ВОЛГИН —
начальник Управления
строительства
завода № 12
с марта 1946 по 1949 г.**

например объектов Миннефтехимпрома, расположенных в Ангарске и Омске, отделений Академии наук в Новосибирске и др.; строительство ракетных стартов и уранодобывающего комбината в г. Краснокаменске.

Проект реконструкции завода № 12 вначале осуществлял (при участии ГСПИ-11) Гипроредмет. Позднее проекты реконструкции выполняли ГСПИ-11 и ГСПИ-12.

В Управлении строительства завода при выполнении строительно-монтажных работ на руководящих должностях в 1945–1949 гг. работали С.А. Строкин, И.Н. Филимонов, М.А. Казаченко, М.И. Герасимов.

В службах главного технолога и главного металлурга были созданы специальные опытные установки и цеха.

Первая реконструкция завода была утверждена постановлением Совнаркома от 13 октября 1945 г. Всего же в период до 1958 г. на заводе было утверждено 6 очередей комплексной реконструкции завода.

Важнейшей задачей завода № 12 в начальный период была разработка промышленной технологии изготовления металлических урановых блоков для загрузки в первый промышленный уран-графитовый реактор. В урановом сердечнике диаметром 35 мм не должно быть примесей, сильно поглощающих нейтроны (бор, редкоземельные элементы и др.). Он герметично очехловывался алюминиевой оболочкой толщиной 1 мм и в условиях работы ядерного реактора охлаждался химически очищенной водой, имеющей скорость в зазоре блок–труба около 5 м/с. Урановые блоки загружались в примерно 1100 технологических каналов по 75 блоков в каждый. Для парабтки заданного количества плутония урановые блоки без изменения размеров и нарушения герметичности должны были облучаться в реакторе в течение 3–4 мес. Однако до этого нужно было изготовить (без оболочки) приблизительно 50 т изделий из урана для лаборатории № 2.

Первые технические условия на изготовление закиси-оксида урана и металлического урана для реактора Ф-1 были разработаны И.В. Курчатовым в 1944 г., а на изготовление блоков из металлического урана – 22 февраля 1946 г. [24]. Решение о промышленном производстве металлического урана на заводе № 12 было принято в конце 1945 г.

Сразу же столкнулись с первыми трудностями. Так, «...при горячем литье в графитовые изложницы в уран попадал из графита бор. Загрязнение бором происходило также из эмали, которой были покрыты технологические сосуды. Уран очень загрязнялся железом, содержащимся в металлическом кальции и применявшимся для восстановления урана» [24]. Большинство продукции шло в брак. Об обстановке, сложившейся с получением чистого урана, И.В. Курчатов в 1945 г. докладывал правительству (И.В. Сталину): «Эта задача (выполнение требований к чистоте металлического урана)

хотя и трудна, но все же, конечно, вполне выполнима. Лично для меня является убедительным тот факт, что в случае более грубого производства графитированных электродов уже достигнут уровень загрязнений по крайней мере в 20 раз меньший, чем мы этого требуем для металлического урана». В докладной записке И.В. Курчатов не указывал ответственных должностных лиц, а отмечал, что получение металлического урана идет совершенно неудовлетворительно из-за плохой организации работ в этом направлении [24]. В уточненных технических условиях на изготовление заводом № 12 для реактора Ф-1 партии урановых металлических блоков диаметром 32 мм (высота 100 мм) предусматривался контроль допустимых примесей по 14 элементам. На примеси других элементов ограничения не вводились из-за отсутствия методов их аналитического контроля.

Контроль за примесью бора проводил лично И.В. Курчатов. Руководители ПГУ Б.Л.Ванников и П.Я.Антропов обеспечивали работу завода всем необходимым. В частности, металлический кальций самолетами поставляли из Германии (г. Битерфельд), так как производство своего кальция на заводе в 1946 г. еще не было организовано [142]. Первое чрезвычайное событие, связанное с загрязнением урана бором, произошло в ноябре 1946 г., когда содержание бора в одной из партий урановых блоков для реактора Ф-1 превысило установленную норму примерно в 100 раз. Проверяли все: и немецкий кальций, и графитовые тигли для плавки урана, и графитовые изложницы для розлива металла. Оказалось, что виноват Московский графитовый завод (директор С.Е. Вяткин), который отгрузил заводу № 12 изложницы из нехлорированного графита. Вспоминая этот период, директор завода № 12 писал: «А.П. Завенягин мне говорил: «Ты, т. Каллистов, тогда танцевал на острие бритвы» [142].

Как отмечалось, в ПГУ с 26 октября 1946 г. работал Аналитический совет. Для улучшения его работы в состав совета ввели по одному представителю от каждой аналитической лаборатории, выполняющей поручения ПГУ, а среди постоянных членов совета были крупные ученые И.П. Алимарин, Д.И. Рябчиков, И.В. Тананаев, Ю.А. Черников, В.А. Марков, В.И. Баранов, В.И. Лисицин, П.А. Волков, позднее Л.В. Липис и др. Был даже установлен постоянный день работы совета — каждая среда с 17⁰⁰. Весь 1946 г. Аналитический совет работал в основном над вопросами обеспечения методиками уранового производства завода № 12*. На заводе создается ЦЗЛ численностью 60 чел., а к 1948–1950 гг. — приблизительно в 4 раза больше. Об интенсивности работы аналитиков ЦЗЛ можно судить по количеству проводимых тогда анализов (табл. 35).

* В 1947–1948 гг. усилия Аналитического совета были направлены на анализ продукции заводов Б и В комбината № 817.

Таблица 35

Объем работы ЦЗЛ завода № 12 в 1947—1951 гг.

Год	Численность персонала	Количество анализов, тыс.		
		химических	спектральных	всего
1947	199	63,8	31,1	94,9
1948	231	51,5	29,8	81,3
1950	263	62,3	36,2	98,5
1951	263	73,1	31,5	104,6

После преодоления многих трудностей на заводе № 12 было налажено производство металлургических урановых блоков. В 1946 г. только для реактора Ф-1 было изготовлено 19 тыс. блоков диаметром 32 и 35 мм, массой 36 т, а также 9 т шаров диаметром 80 мм, изготовленных из диоксида урана. Эти блоки и шары удовлетворяли техническим требованиям, и на реакторе Ф-1 25 декабря 1946 г. впервые на континенте Европы и Азии была осуществлена управляемая цепная ядерная реакция.

Откуда же в 1945—1948 гг. на завод № 12 поступал уран и как осуществлялась реконструкция завода?

Урановое сырье в виде черного порошкового урана, из которого делали первые урановые блоки, было трофейным. В первой половине 1947 г. на заводе № 12 был введен цех по переработке привозных богатых урановых руд. Бедные же отечественные руды с 1947 г. начали перерабатывать на заводе № 906 в Днепродзержинске (директор М.П. Аношкин) [142].

Более двух десятков зданий было реконструировано и построено в целях выпуска продукции для предприятий атомной промышленности (табл. 36).

Таблица 36

Развитие производств на заводе № 12

Производство	Число основных корпусов	Годы работы	Производственная площадь, тыс. м ²	Стоимость капиталовложений, млн. руб.
Получение изделий из урана:				
опытное	1	1946—1967	5,4	13,7
основное	4		15,1	
Переработка урановых руд	4	1947—1957	25,9	11,0
Получение калыция	4	1948—1967	18,0	4,1
Получение радия	2	1950—1960	8,8	3,5

На заводе в 1946 г. работало около 4600 чел., из них примерно 700 инженерно-технических работников, в том числе с высшим образованием приблизительно 100 чел. В начальный период на заводе работало много ученых и специалистов не только из Гиредмета и НИИ-9, но и из других институтов, а также специалисты из Германии. Немецкие специалисты наладили на заводе производство металлического урана восстановлением оксида урана кальций-термическим методом. Технология была несовершенна, и сотрудники НИИ-9 из лаборатории профессора А.Н. Вольского с участием А.Г. Самойлова ее совершенствовали. В 1946 г. была внедрена технология кальций-термического восстановления урана из UF_4 .

Были на заводе при отработке технологии получения металлического урана и аварийные ситуации. Как вспоминает ветеран отрасли А.Г. Самойлов [38], в цехе, где начальником был Н.Н. Синиченко, уран получали по немецкому методу. «Проводилось восстановление закиси-оксида урана (в виде стружки) с добавлением в шихту хлористого кальция (для шлакообразования). Вся шихта в герметичном металлическом аппарате нагревалась, затем проводили химическое выщелачивание и получали металлический порошок урана». Одновременно в этом же цехе главный металлург Ю.Н. Голованов проводил опытные плавки по получению металлического урана восстановлением тетрафторида урана дистиллированным кальцием. При одной из плавов произошло следующее: «...после длительного, нарастающего гула с разогретого аппарата сорвалась с прочных болтов крышка и, улетев через окно, упала в несколько десятках метров от здания цеха. От огненной массы, вылетевшей из реактора, возник пожар в цехе. Мы все, до приезда пожарных, участвовали в тушении пожара. Впредь к таким плавкам мы были более внимательны, а плавки проводились через каждые три-пять дней в том же цехе в течение многих месяцев».

При выполнении работ по получению металлического урана большое значение имело создание надежного плавильного тигля. В НИИ-9 была специальная керамическая лаборатория, которой руководил С.Г. Тресвятский. Над совершенствованием тигля в институте работали и сотрудники металлургической лаборатории НИИ-9. Технология нанесения на внутреннюю поверхность тигля, состоящую из точеной оболочки (армко-железо), футеровки из оксида магния или кальция отрабатывалась Ф.Г. Решетниковым, А.Г. Самойловым и М.А. Дунским. Не останавливаясь на деталях технологии нанесения футеровки, которая осуществлялась разными методами, приведем другой случай, связанный с большой опасностью при проведении высокотемпературных плавов урана: «...во время проведения опытной плавки с большим грохотом сорвало крышку аппарата, и продукты плавки при высокой температуре были с большой силой

выброшены, ударились в потолок и приварились к нему. К счастью, при этом никто не пострадал». Этот случай показал, что необходимо ...«в первую очередь, усилить меры борьбы с присутствием следов влаги на внутренних поверхностях аппаратуры, всех деталей ее оснастки и в применяемом аргоне».

С использованием природного металлического урана как имитатора, на заводе № 12 была отработана и технология получения слитков из высокообогащенного ^{235}U . По методике и аппаратуре, отработанной при активном участии А.Г. Самойлова и М.А. Дунского, керамическая лаборатория НИИ-9 изготовляла указанные тигли. Партии этих тиглей в герметичной упаковке самолетами отправлялись на завод В комбината № 817, где изготовлялись детали из металлического ^{235}U , для ядерных зарядов.

Опасные технологические операции на заводе № 12 были и при использовании в металлургии фтора.

Гексафторид урана в первые годы решения программы № 1 получали на заводах Наркомхимпрома. Как вспоминал ветеран отрасли А.С. Леонтичук, активный участник создания Сибирского химического комбината и, в частности, производства UF_6 , первые баллоны с UF_6 поступили в 1947 г. на завод № 12 из Дзержинска. Технологию получения этого продукта по указанию М.Г. Первухина разработал головной институт Наркомхимпрома НИИ-42. Еще во второй половине 1943 г. в этом институте в лаборатории Б.А. Алексеева были получены первые 10 г UF_6 . В середине 1944 г. Наркомхимпром принял решение строить на заводе «Рулон» в г. Дзержинске специальный цех, спроектированный ГСПИ-3 под руководством А.С. Федулова и П.Г. Хаина, научным руководителем проекта был Б.А. Алексеев. UF_6 получали из UF_4 . Поэтому внедрение технологии получения металлического урана из UF_4 по разработкам НИИ-9 потребовало создания нового производства на заводе «Рулон». Впоследствии производство элементарного фтора, UF_4 и UF_6 было организовано на заводе в Кирово-Чепецке, а затем на Сибирском химическом комбинате [143]. Первыми разработчиками превращения в оксиды и металлический уран поступившего на завод № 12 в 1947 г. UF_6 были заводские работники Н.П. Галкин, С.И. Зайцев и М.М. Гурин. В продукте, поступившем из г. Дзержинска, кроме UF_6 находились примеси ванадия, хрома, фосфора, молибдена и других элементов, игравшие отрицательную роль. При очистке анализировали содержание примесей на различных стадиях получения урановых сердечников для загрузки в первый промышленный ядерный реактор.

28 января 1948 г. вышло постановление правительства, обязывающее 4 института (ВИАМ, НИИхиммаш, НИИ-9 и НИИ-13) разработать способ герметизации урановых блоков для первого промышленного ядерного реактора. В этом постановлении отмечалось, что

каждый институт должен был обеспечить экспертизу методов покрытия защитной оболочкой уранового сердечника, разрабатываемых другими НИИ [24]. Герметизация уранового сердечника должна была исключить контакт урана с водой, охлаждающей активную зону реактора, и обеспечить неизменность размеров блока. Программу испытания урановых блоков разрабатывал ЛИПАН и 26 августа 1946 г. направил ее всем институтам. Как отмечает В.В. Гончаров [24], на стенде НИИхиммаша предусматривались испытания:

- деформации на удар при падении в технологическом канале реактора (длина ~20 м);
- герметичности оболочки;
- теплопроводности и резкого изменения температуры;
- разбухания оболочки, размеров и поверхности блоков.

Специальная комиссия в составе В.С. Емельянова, В.Ф. Калинина, В.И. Меркина, В.В. Гончарова осуществила испытания 5 партий по 20 блоков и признала лучшими работы ВИАМа и НИИ-13. Этим институтам и были поручены дальнейшие работы по герметизации урановых сердечников.

Над усовершенствованием технологии получения металлического урана работали и в Наркомате электропромышленности. Так, в НИИ-627 профессор А.С. Займовский проводил в 1946 г. опыты по расплавлению черного слитка урана в высокочастотной печи. По рекомендации А.С. Займовского на заводе № 12 были установлены высокочастотные печи АЯКС для промышленной рафинировки металла. Тогда на заводе работали и другие ученые из академических институтов, среди них – академик А.А. Бочвар*, работавший ранее в Институте цветных металлов и золота и других НИИ. Им еще в 1936 г. был разработан метод кристаллизации фасонных отливок под давлением. Под научным руководством А.А. Бочвара, А.С. Займовского и А.Г. Самойлова [38] на заводе № 12 отрабатывалась технология получения из металлического урана природного обогащения полусферических деталей. Эти полусферы различных диаметров использовали на комбинате № 817 при определении критических масс растворов в сферах с урановыми отражателями различной толщины [144]. Затем, используя опытную базу завода № 12, отработывали технологию получения других полусфер из высокообогащенного урана для атомных бомб, которые изготавливали на заводе В комбината № 817. В 1946 г. А.А. Бочвар и А.С. Займовский² были переведены в НИИ-9, но основной их работой тогда было совершен-

* В начальный период на заводе № 12 А.А. Бочвар руководил опытным цехом (корпус 80).

² Впоследствии работал заместителем директора ВНИИНМа; лауреат Ленинской и Государственных премий. Один из активнейших авторов создания технологических процессов изготовления урановых блоков на заводах Минсредмаша.

ствование на заводе № 12 технологических процессов получения изделий из металлического урана для новых промышленных реакторов и работ с плутонием и ^{235}U на заводе В комбината № 817.

Главной задачей завода № 12 было освоение промышленной (многотоннажной) технологии получения урановых блоков*. И.В. Курча-тов докладывал правительству 15 августа 1946 г., что процессу заключения урановых блоков в оболочку уделялось всегда серьезное внимание и на заводе № 12 и в институтах была проведена очень большая работа. Процесс изготовления оболочки и герметизации урановых блоков состоял из следующих операций:

- штамповки стаканов из листовой алюминиевой заготовки;
- калибровки через матрицу стакана с вставленным в него урановым сердечником;
- закатки торца;
- нагрева в печи образцов, помещенных в кассеты;
- резкого охлаждения нагретых кассет в холодной воде;
- травления и оксидирования блоков.

Дальнейшие испытания показали, что технология ВИАМа и НИИ-13 может быть принята при изготовлении урановых блоков для загрузки первого промышленного реактора. НИИ-13 разработал метод нанесения никелевого покрытия на урановый сердечник, который затем помещался для герметизации в алюминиевую оболочку по технологии ВИАМа. Поэтому Р.С. Амбарцумян, А.М. Глухов (ВИАМ) и П.П. Пытляк (НИИ-13) со своими сотрудниками признаны основными по вкладу в освоение производства герметизации урановых блоков на заводе № 12. Контроль пригодности загрузки урановыми блоками промышленного реактора проводился также в ЛИПАНе на реакторе Ф-1.

Во втором квартале 1947 г. завод № 12 закончил выпуск урановых блоков для загрузки первого промышленного реактора. Большие усилия в выполнение этой сверхответственной работы внесли руководители завода Ю.Н. Голованов, А.Н. Каллистов, С.И. Золотуха, а также Н.Ф. Квасков.

Производство урановых блоков из металлического урана непрерывно совершенствовалось, а его объем возрастал. Сначала на комбинате № 817, затем № 816 и других предприятиях вводились новые ядерные реакторы для производства плутония. Успешная работа завода была высоко оценена правительством. В конце 1949 г. А.Н. Каллистов и Ю.Н. Голованов были награждены орденом Ленина и медалью «Золотая Звезда». За организацию промышленного производства урановых

* Руководителем корпуса 10, который, как отмечает А.Н. Каллистов, называли большим заводом по изготовлению урановых блоков, был А.Р. Белов, который затем работал директором ряда предприятий Минсредмаша.

блоков были также присуждены Государственные премии следующим сотрудникам завода: Ю.Н. Голованову, С.И. Золотухе, Н.С. Козлову, М.М. Гурину, Н.С. Смирнову, Т.А. Пуртовой, А.А. Третьякову, В.Д. Севруку, А.В. Галюку, Н.П. Штукину, А.Н. Партину, И.Г. Образцову. Совершенствование технологии производства радиационно стойких сплавов урана и изготовления урановых блоков, используемых для наработки плутония, было главной задачей и в НИИ-9. Эти работы осуществлялись под руководством А.А. Бочвара и А.С. Займовского лабораториями и группами, руководимыми Г.Я. Сергеевым, В.В. Титовой, К.А. Борисовым и др. С их участием были разработаны сплавы урана с высокой стойкостью. Работникам завода и НИИ-9 была присуждена Ленинская премия. (Кроме работников завода № 12, ВИАМа Ленинская премия была присуждена А.А. Бочвару, Г.Я. Сергееву и В.В. Титовой.) В дальнейшем в НИИ-9 под руководством члена-корреспондента АН СССР С.Т. Конобеевского учеными института и его учеником — сотрудником ЦЗЛ комбината № 817 А.Г. Ланиным изучалась ползучесть урана под действием нейтронного излучения и различных механических нагрузок.

Увеличение объемов производства урана, а также мощности реакторов и связанное с этим возрастание плотности нейтронных потоков наряду с повышением накопления плутония в урановых блоках резко увеличили объемы исследований по получению разных сплавов урана. Это привело к необходимости более глубокого изучения структурных изменений в кристаллической решетке урана [145], увеличению работ по рентгено-структурному анализу (табл. 37).

Можно представить, какой трудной и ответственной была на заводе № 12 рабо-



**РУБЕН
СЕГЕЕВИЧ
АМБАРЦУМЯН**
(1911—1971) —

заслуженный деятель
науки и техники,
член-корреспондент
АН СССР с 1966 г.

Таблица 37

Металлографические исследования в ЦЗЛ завода № 12

Год	Число контролируемых параметров	Число определений	Число исполнителей	
			ИТР	Лаборанты
1958	6	15911	5	44
1959	12	45536	7	48
1968	32	434993	12	41
1969	39	672168	12	39

та служб и лабораторий при отбраковке реактивов, исходного сырья и материалов для изготовления урановых блоков и другой продукции.

Другие материалы и изделия для создания ядерного и термоядерного оружия

Завод № 12 сразу после получения на комбинате № 813 другого вида ядерной взрывчатки — обогащенного ^{235}U * стал первым предприятием отрасли, на котором изготовляли блоки для загрузки в ядерные реакторы сначала с обогащением ^{235}U 2%, а затем и более высоким.

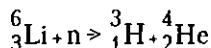
В августе 1950 г. было принято решение о строительстве в стране первого реактора для наработки специальных изотопов. Таким реактором, который был пущен 22 декабря 1951 г. в Челябинске-40, был реактор АИ небольшой мощности (<100 МВт). Его построили примерно за 1,5 года. Эта спешка была связана с необходимостью наработки трития для термоядерного оружия [113, 146]. Эффективным сырьем для наработки трития должен быть литий, обогащенный легким изотопом ^6Li . Как отмечал в воспоминаниях о И.В. Курчатове заместитель начальника ПГУ В.С. Емельянов, для создания термоядерного оружия необходимо было создание таких же сложных производств, как для получения ^{235}U и плутония [11]. Для этого необходима была организация научных исследований по получению тяжелых изотопов водорода (дейтерия и трития) и разделения изотопов лития.

В чистом виде литий был получен в 1855 г. немецким химиком Р. Бунзеном. Он состоит из ^7Li (92,7%) и ^6Li (7,3%). Так как из ^6Li нарабатывается тритий, в атомной промышленности в основном используются литиевые соединения, обогащенные ^6Li . Поэтому значимость лития для изготовления оружия и термоядерной энергетики так же велика, как урана для ядерной энергетики и получения плутония.

* Без диффузионных фильтров, изготавливаемых на заводе № 12, получение обогащенного ^{235}U было бы невозможно, особенно в начальный период.

В нашей стране впервые вопрос о создании водородной бомбы был поставлен в 1946 г. в специальном докладе правительству. Авторами этого доклада были сотрудники, работавшие в лаборатории № 2, И.И. Гуревич, Я.Б. Зельдович, И.Я. Померанчук и Ю.Б. Харитон [80]. В 1948 г. в ФИАНе (директор С.И. Вавилов) под руководством академика И.Е. Тамма, ученого с мировым именем*, создается группа теоретиков, которой постановлением правительства было поручено исследовать возможность создания термоядерного оружия. К тому времени было известно, что в США ведутся исследования по созданию водородной бомбы². Американцы изучали возможности реакции соединения ядер дейтерия (^2H) и более тяжелого ядра водорода — трития (^3H).

Синтез тяжелых ядер водорода может происходить при очень высоких температурах и высвобождать существенно большую энергию, чем при делении ядер урана и плутония (табл. 38). При температурах около 20 млн. °С мгновенной реакции выделения тепла и термоядерного взрыва с использованием не только изотопов лития, но и дейтерия получить нельзя. При использовании же трития скорость реакции примерно в 200 раз быстрее, чем при синтезе ядер дейтерия. При более высоких температурах скорости реакции синтеза ядер лития и изотопов водорода позволяют получить термоядерный взрыв. Таких температур можно достичь только при использовании атомной бомбы в качестве запала. Однако, как пишет соратник А.Д. Сахарова, один из разработчиков термоядерного оружия Ю.А. Романов: «если ее просто окружить жидким дейтерием, это не приведет к заметному увеличению мощности взрыва. ...Из-за разлета вещества при высоком давлении и падения температуры из-за теплоотдачи скорость температурной реакции синтеза очень мала, так что в такой конструкции успевает прореагировать только ничтожная часть ядер дейтерия» [80]. При использовании же трития, с которым дейтерий реагирует в сотни раз быстрее (см. табл. 38), положение существенно улучшается. Однако трития в природе нет, а для его получения по реакции



необходимо иметь ядерные реакторы с высоким потоком нейтронов.

Термоядерное оружие может быть получено и при реакциях синтеза изотопов лития и дейтерия. Однако температура этой реакции должна быть существенно выше. Кроме того, главным вкладом в термоядерное оружие, сделанным А.Д. Сахаровым, является не

* П.А. Черенкову, И.Е. Тамму и И.М. Франку в 1958 г. была присуждена Нобелевская премия по физике за открытие, объяснение и использование эффекта, носящего имя Черенкова.

² Инициатива создания водородной бомбы в США принадлежит Э. Теллеру и относится к 1942 г.

Таблица 38

**Характеристики важнейших термоядерных реакций
на изотопах водорода и лития [69]**

Реакция	Тепловой эффект, МэВ	Скорость реакции, с	
		при 20 млн. °С	при 200 млн. °С
$2\text{H} + 2\text{H} \rightarrow n + 2\text{He}$	3,26	$1,9 \cdot 10^{-3}$	$1,9 \cdot 10^{-6}$
$2\text{H} + 2\text{H} \rightarrow {}^3\text{H} + {}^3\text{H}$	4,03	$1,9 \cdot 10^{-3}$	$1,9 \cdot 10^{-6}$
$2\text{H} + {}^3\text{H} \rightarrow n + 2\text{He}$	17,6	$3,9 \cdot 10^{-5}$	$2,4 \cdot 10^{-7}$
${}^6\text{Li} + {}^2\text{H} \rightarrow 2 {}^4\text{He}$	22,4	$7,5 \cdot 10^3$	$7,5 \cdot 10^{-5}$
${}^6\text{Li} + {}^1\text{H} \rightarrow {}^3\text{He} + 2 {}^4\text{He}$	4,02	180	$4,5 \cdot 10^{-4}$
${}^7\text{Li} + {}^2\text{H} \rightarrow n + 2 {}^4\text{He}$	14,9	$2,4 \cdot 10^3$	$2,4 \cdot 10^{-5}$
${}^7\text{Li} + {}^1\text{H} \rightarrow 2 {}^4\text{He}$	17,3	$1,8 \cdot 10^3$	$4,5 \cdot 10^3$

только использование оболочки из природного урана и гомогенной смеси дейтерия с тритием. Он предложил гетерогенную конструкцию из чередующихся слоев легкого вещества (дейтерий, тритий и их химические соединения) и тяжелого ^{238}U , названную им «слоистой». Идея применения в «слоистой» ${}^6\text{Li}$ принадлежит сотруднику ФИАна В.Л. Гинзбургу*. С его легкой руки дейтерид лития (LiD), по-видимому из режимных соображений, называли тогда «лидочкой» [80]. Получение «лидочки» требовало организовать ряд производств, включая разделение изотопов легких элементов. Кроме предприятий химической промышленности к этим проблемам были подключены предприятия ПГУ, в том числе и завод № 12.

После пуска в конце 1951 г. реактора АИ на нем стал нарабатываться тритий. Технология его выделения из облученных литиевых блоков, а также получения необходимых соединений для использования в оружии в ряде случаев была драматичной и непрерывно совершенствовалась. Первое испытание термоядерного оружия было проведено 12 августа 1953 г. на Семипалатинском полигоне². Председателем Государственной комиссии был министр Средмаша В.А. Малышев. В ее состав входили И.В. Курчатов, И.Е. Тамм, А.Д. Сахаров, Б.Л. Ванников, А.М. Василевский. Как отмечает академик Е.Н. Аврорин, настоящая термоядерная бомба у нас в стране

* Работал вместе с А.Д. Сахаровым в группе И.Е. Тамма; член-корреспондент АН СССР с 1953 г., академик с 1966 г.

² Сразу же после взрыва В.А. Малышев, А.Д. Сахаров, И.В. Курчатов и другие осматривали эпицентр испытаний. Ими были получены большие дозы облучения [31].

была испытана в ноябре 1955 г. До этого было испытание термоядерного устройства [147].

В реакторах для наработки значительных количеств трития и других изотопов, сильно поглощающих нейтроны, в качестве ядерного горючего, как правило, используется не природный уран, а обогащенные ^{235}U урановые блоки. Избыточные нейтроны, получаемые при делении ^{235}U , захватываются в мишенях для наработки полезных изотопов. Такими мишенями для наработки трития служат блоки из обогащенного ^6Li . Количество же нарабатываемого плутония в ядерных реакторах в блоках из обогащенного ^{235}U резко снижается, так как с ростом обогащения ^{235}U количество ^{238}U , из которого при захвате нейтронов получается плутоний, уменьшается даже при обогащении 2% приблизительно в 3 раза. При изготовлении урановых блоков с обогащением 90% количество ^{238}U , а следовательно, и удельная наработка плутония снижаются во много раз. Причем нарабатываемый плутоний, накапливаемый в урановых блоках, не годится для военных целей. При больших выгораниях в плутонии накапливается очень много балластного изотопа — ^{240}Pu .

Термоядерные реакции, приведенные в табл. 38, зависят от плотности смеси изотопов водорода и лития. В ней нежелательно присутствие тяжелых элементов, так как их примеси повышают теплоемкость смеси и снижают эффективность реакции [69]. Требованиям высокой плотности смеси и отсутствия балластных примесей лучше всего удовлетворяет солеобразное соединение водорода с литием — гидрид лития (LiH), плотность которого в обычных условиях равна $0,82 \text{ г/см}^3$ (LiH может существовать в шести изотопных модификациях: ^6LiH , ^7LiH , $^6\text{Li}^2\text{H}$, $^7\text{Li}^2\text{H}$, $^6\text{Li}^3\text{H}$, $^7\text{Li}^3\text{H}$).

Не останавливаясь на проблемах, связанных с созданием термоядерного оружия, о чем кроме Ю.А. Романова в этюдах к научному портрету А.Д. Сахарова пишет В.И. Ритус [148], а также на известном вкладе И.Е. Тамма, А.Д. Сахарова, В.Л. Гинзбурга и других ученых в создание этого оружия, хочется отметить, что на заводе № 12, а до этого на других предприятиях получали для него исходное сырье.

В разработку технологии разделения изотопов легких элементов в нашей стране основной вклад внес академик Б.П. Константинов*. Под его руководством был разработан метод разделения изотопов, который послужил основой для организации промышленного производства в широких масштабах [5].

После очередной реконструкции на заводе № 12 начали выпускать не только ^6Li , но и его гидриды. Как правило, для получения новой продукции на заводе использовались небольшие старые цеха, ранее выпускающие боеприпасы.

* Работал в ЛФТИ, сначала заведующим лабораторией и отделом, затем директором; член-корреспондент АН СССР с 1953 г., академик с 1960 г.; с 1967 г. вице-президент АН СССР.

На рис. 37 показан корпус № 132, к которому была сделана пристройка, где разместили опытную установку для разделения изотопов лития.

К тому времени кроме этих производств на заводе действовали и производства, обеспечивающие специальными фильтрами и магнитами оборудование завода для обогащения изотопов урана (табл. 39). После 1950 г. выделяли также радий из урановой руды для различных потребителей. На заводе даже выпускали источники излучений, в том числе и с использованием радия.

Таблица 39

Основные виды продукции завода № 12

Продукция	Годы	Производственная площадь, тыс.м ²	Капиталовложения, млн.руб.
Диффузионные фильтры	1948–1960	4,3	1,5
Нейтронные и γ -источники	1956–1967	2,1	1,1
Литий	1956–1962	7,2	10,2
Металлический литий и его гидриды	1956	4,0	1,9
Магниты	1960–1967	5,5	1,9

Реконструкция завода была непрерывной еще и потому, что технология части освоенных производств передавалась другим предприятиям. Если до 1954 г. на заводе в основном развивались химико-металлургические производства, то после пуска первой АЭС на заводе началась разработка технологий по выпуску твэлов для различных АЭС, ядерно-энергетических установок ВМФ, а также всех видов



Рис. 37. Корпус № 132

экспериментальных ядерных реакторов, построенных в нашей стране и странах Восточной Европы.

В отличие от промышленных ядерных реакторов нахождение твэлов в активной зоне реактора АЭС в десятки раз длительнее и составляет от 2 до 3 лет. Весь этот срок должна быть обеспечена надежная работа твэлов. На начальной стадии было много трудностей.

На первом промышленном реакторе А в 1948–1949 гг. были открыты эффекты, связанные с радиационным ростом урана и графита. Для изучения механизмов этих эффектов необходимо было построить в ЛИПАНе специальную базу, включающую экспериментальный ядерный реактор (РФТ) и горячую материаловедческую лабораторию для работы с высокорadioактивными материалами. Предложение о строительстве было сделано И.В. Курчатовым и А.П. Александровым в 1949 г. Ими также предлагалось: «в связи с очень большим объемом работ по испытанию твэлов в РФТ необходимо соорудить на заводе № 12 в г. Электростали второй материаловедческий реактор типа РФТ, но с большей мощностью» [24, 99]*.

В 1952 г. в ЛИПАНе был построен указанный исследовательский центр. На заводе № 12 подобного реактора не было. Испытание стойкости твэлов, изготавливаемых на заводе № 12 для всех исследовательских реакторов, АЭС и реакторов ВМФ, тогда проводилось в ЛИПАНе.

Природа радиационного роста урана при различных условиях его облучения изучалась в стране под научным руководством С.Т. Конобеевского. Совершенствование же на заводе № 12 технологических процессов изготовления более надежных и стойких к радиационному росту урана твэлов в основном велось работниками НИИ-9 под научным руководством А.С. Займовского. Нельзя не отметить и большой вклад ученых из других институтов. Так, в разработке технологии и создании дисперсионного твэла для первой АЭС очень большая заслуга принадлежит коллективу сотрудников ФЭИ под руководством В.А. Малых.

Разработка экспериментальных реакторов РФТ (ЛИПАН), АИ (комбинат № 817) и ТВР (лаборатория № 3) была невозможна без использования в них твэлов с обогащенным ураном. Если первые опытные ядерные реакторы имели в твэлах обогащение ^{235}U только 2%, то впоследствии обогащение ^{235}U в большинстве исследовательских реакторов было увеличено сначала до 10–36%, а затем и до 90%. О конструкции твэлов, используемых в исследовательских реакторах, можно судить по рис. 38. В отличие от простейших урановых блоков, используемых в промышленных уран-графитовых реакторах (включая и реакторы Сибирской АЭС), в экспери-

* Реактор РФТ с 5 петлевыми установками был первым в мире петлевым материаловедческим реактором с рекордной для того времени плотностью потока нейтронов – $5 \cdot 10^{13}$ нейтр./ $(\text{см}^2 \cdot \text{с})$.



**СЕРГЕЙ
ТИХОНОВИЧ
КОНОБЕЕВСКИЙ**
(1890–1970) —
член-корреспондент
АН СССР с 1946 г.

ментальных реакторах твэлы могут быть кольцевыми, многослойными, различной конфигурации, где каждый слой, содержащий уран, герметично очехловывается оболочкой из алюминия, стали, циркония и различных сплавов. Такие твэлы называют тепловыделяющими сборками (ТВС). В них ядерное топливо, состоящее из частиц обогащенного урана (плутония), размещается в матрице из неделящегося вещества, которое слабо захватывает нейтроны. Указанные твэлы называют дисперсионными. Под радиационной стойкостью твэла подразумевается его способность в течение всего периода облучения в реакторе сохранить неизменные размеры, чтобы это не нарушало нормальной работы реактора. Одновременно в твэле в течение всего срока его работы должны удерживаться все продукты деления, а оболочка должна оставаться герметичной. Радиационная стойкость таких твэлов определяется следующими факторами:

- величиной зерен и объемным содержанием делящейся фазы, структурой дисперсионной композиции;
- видом делящегося соединения, используемого в качестве делящейся фазы дисперсионной композиции;
- свойствами материала матрицы, влиянием на них технологии изготовления;
- режимом работы твэла в ядерном реакторе (температура, термические циклы, вибрация, кавитация, охлаждение и т.д.);
- изменением свойств делящегося материала и матрицы при облучении;
- конструкцией твэла и материалом оболочки;
- видом теплоносителя и наличием в нем примесей, способствующих возникновению коррозионного растрескивания, наличием отложений на поверхности твэла.

Ввиду сложности проблемы была необходима совместная работа персонала атомных станций, научных руководителей и главных конструкторов реакторов, разработчиков твэлов (НИИ-9, ВИАМ и др.) и технологов завода № 12.

Подробное описание большинства используемых дисперсионных твэлов в различных реакторах, как и многие данные об их изготовлении на заводе № 12, приведены в известных монографиях [60, 149].

В ядерной энергетике в качестве топлива основных реакторов (ВВЭР и РБМК) используется диоксид обогащенного урана (UO_2).

По сравнению с металлическим ураном UO_2 обладает большей стабильностью при облучении. Сравнивая скорость роста объема UO_2 и металлического урана, автор публикации [24] отмечает, что UO_2 имеет скорость роста, в 12 раз меньшую, чем уран. Такое утверждение было сделано на основании многочисленных исследований, проводимых в ЛИПАНе (В.В. Гончаров, П.А. Платонов, А.Д. Амаев и др.), а также в НИИ-9 и на других предприятиях под научным руководством С.Т. Конобеевского. Все опытные партии твэлов и ТВС для испытаний в реакторах изготавливались сотрудниками завода № 12. На заводе и в НИИ-9 разрабатывалась технология получения оксидов и других соединений урана (табл. 40).

Радиационная стойкость наиболее изучена в твэлах, изготовленных из UO_2 , которые нашли самое широкое применение в ядерной энергетике. В зависимости от обогащения ^{235}U конструкторы и технологи — разработчики твэлов могут выбрать любое из приведенных соединений для использования как в экспериментальных, так и в энергетических реакторах большой мощности.



**АЛЕКСАНДР
СЕМЕНОВИЧ
ЗАЙМОВСКИЙ**
(1905–1990) —
член-корреспондент
АН СССР с 1958 г.

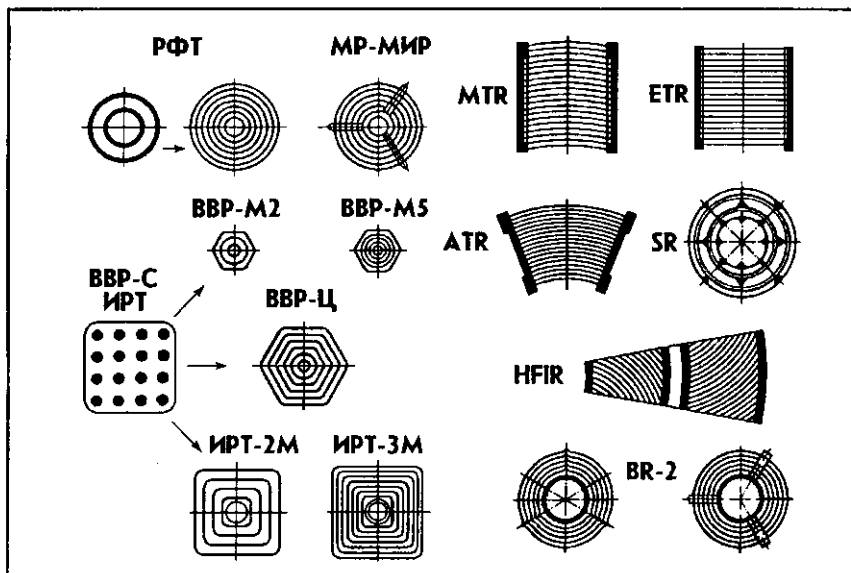


Рис. 38. Сечения ТВС отечественных (слева) и зарубежных (справа) реакторов

Для всех первых АЭС топливные композиции, твэлы и ТВС изготавливались на заводе № 12.

Если в ТВС реактора РБМК располагается 18 твэлов, то в ТВС реакторов ВВЭР — во много раз больше. ТВС, собранная со всеми другими элементами, обеспечивающими загрузку и разгрузку ядерного топлива, называют кассетами. На рис. 39 показана кассета серийного реактора РБМК, содержащая 13 основных деталей и узлов, часть из которых являются сложными конструкциями и изготавливаются из специальных сталей, циркония и других материалов*. Длина собранной кассеты, состоящей из 2 ТВС, превышает 10 м. Количество твэлов, изготавливаемых для загрузки одного реактора РБМК, составляет примерно 60 тыс. В твэлах находятся таблетки из спеченного диоксида, материал оболочки твэла — сплав $Zr + 1\% Nb$.

Для всех видов производств самого топлива, твэлов и ТВС на заводе № 12 было создано все необходимое. Кроме химико-металлургических переделов были построены сборочные цеха, различные испытательные стенды и участки, предусматривающие при необходимости резку твэлов и растворение топливной композиции.

* Сплавы из циркония и технологические каналы из него для реакторов РБМК изготавливаются на заводе в г. Глазове, так же как и трубки из специальных сплавов для твэлов.

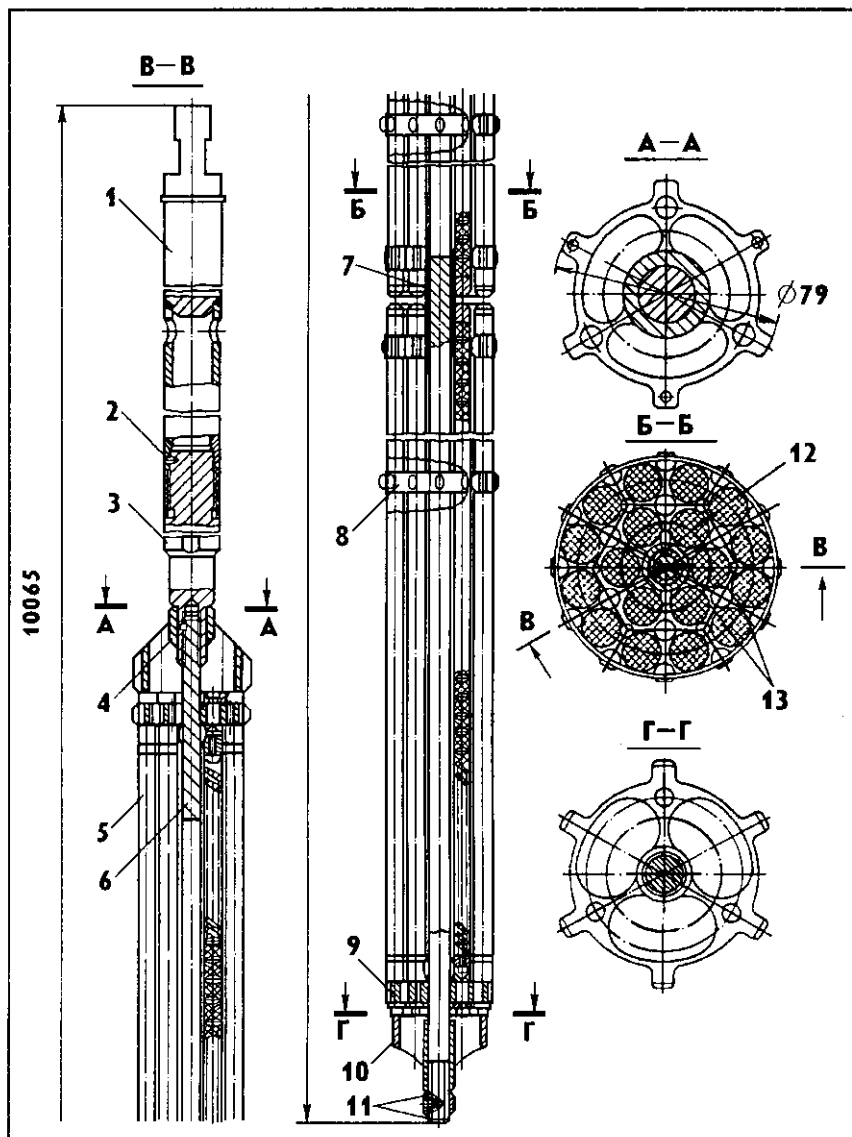


Рис. 39. Кассета РБК:

1 – подвеска; 2 – штифт; 3 – переходник; 4 – хвостовик; 5 – твэл; 6 – несущий стержень; 7 – втулка; 8 – дистанцирующая решетка; 9 – концевая решетка; 10 – наконечник; 11 – гайка; 12 – труба каркаса; 13 – ячейка дистанцирующей решетки

Таблица 40

Свойства соединений урана [60]

Соединение	Содержание урана, мас. %	Температура плавления, °С	Теоретическая плотность, г/см ³	Содержание урана, г/см ³
UO ₂	88,2	2880	10,97	9,68
U ₃ O ₈	84,8	2500	7,90	6,70
UC	95,2	2370	13,63	13,00
UC ₂	90,8	2470	11,68	10,60
UN	94,4	2650	14,32	13,50
U ₃ Si	96,2	930	15,60	15,00
USi	89,5	1600	10,40	9,30
U ₃ Si ₂	92,7	1665	12,20	11,30
UBr ₃	67,0	2000	4,37	2,94
UAl ₃	74,6	1320	6,70	5,00

Размеры твэлов и ТВС и их количество для развивающейся с 1954 г. ядерной энергетики, а также необходимость улучшения условий работы производственного персонала привели к необходимости строительства автоматизированных цехов и участков и к реконструкции завода. За первые 20 лет на заводе было построено 96 тыс.м² новых производственных площадей, а реконструировано в общей сложности >240 тыс.м². Эту работу выполняли многие проектные, конструкторские и строительно-монтажные организации: НИИ-9, ГСПИ-11, ГСПИ-12, НИИхиммаш, сибирский Академпроект, Управление строительства завода № 12, строительные организации СУ-713, различные монтажные организации, входившие в состав соответствующих управлений сначала ПГУ, а затем Минсредмаша.

Успешная работа коллектива завода по выпуску твэлов была высоко оценена. Лауреатами Ленинской премии стали С.И. Золотуха, Т.А. Пуртова, А.Н. Партин, И.Т. Образцов, Д.Д. Соколов, Б.И. Ермолов, З.В. Садчикова, И.И. Кузнецов. За разработку технологии и обеспечение промышленного выпуска диффузионных фильтров Государственную премию получили Ю.Н. Голованов, Ю.В. Ольшевский, Р.А. Трубиных, Ш.С. Будиашвили, В.М. Глухов, Ф.Ф. Квашин и В.И. Майорова. Многие работники завода были отмечены другими правительственными наградами.

Завод № 12 был и остается до настоящего времени главной организацией, обеспечивающей все реакторные научные центры страны твэлами для исследовательских реакторов России и стран ближнего зарубежья [98]. Основной продукцией завода № 12 по-прежнему являются твэлы и ТВС для реакторов РБМК, а также ядерно-энергетических установок ВМФ.

К истории ядерной и радиационной безопасности

Развал СССР, приведший к созданию суверенных независимых государств, изменил не только отношение в ряде стран СНГ к развитию ядерной энергетики, но и к использованию делящихся материалов, находящихся в ядерных боеприпасах (при разоружении). Серьезные нарушения технологической дисциплины происходят даже в армии при техническом обслуживании указанных боеприпасов. Как показала недавняя проверка состояния ядерного оружия, на Украине имеет место переполнение хранилищ сверх всяких норм ядерными боеприпасами в высшей степени боеготовности, что создает условия для возникновения опасных аварий. Создание в странах СНГ собственных вооруженных сил, проведение самостоятельной энергетической политики, а также необходимость ратификации заключенных Россией договоров по сокращению стратегических наступательных вооружений между ядерными державами усложняют проблемы обращения с накопленными запасами плутония и высокообогащенного урана, используемыми в ядерном оружии. Не только эти материалы, но и твэлы, используемые в различных ядерных реакторах (особенно в опытных реакторах, действующих в странах СНГ), могут стать потенциальными источниками повышенной опасности. Уже неоднократно в печати появлялись предложения на Украине и в Казахстане «приватизировать» находящиеся в ядерном оружии ^{239}Pu и ^{235}U . Некоторыми политиками, журналистами, да и учеными ведущих институтов, в первую очередь на Украине, предлагалось даже организовать у себя с помощью иностранных специалистов разборку ядерного оружия, а извлеченный из него плутоний и ^{235}U использовать в качестве топлива для ядерной энергетики. При этом совершенно не обращается внимание на проблемы, которые возникнут с

обеспечением ядерной и радиационной безопасности. Эти проблемы имеют свою длительную и в значительной мере трагическую историю. Отдельные примеры этих трагедий при работе с делящимися материалами приведены в недавних воспоминаниях министра Е.П.Славского, академика А.П.Александрова, адмирала флота В.Н.Чернавина [116].

Результаты упомянутой проверки состояния ядерного оружия на Украине и выявленные нарушения в обращении с ядерными боеприпасами уже доведены до мировой общественности. Руководители федеральных ядерных центров России В.А.Белугин (Арзамас-16) и В.З.Нечай (Челябинск-70) совместно с учеными этих центров академиками Ю.Б.Харитонов, Е.Н.Аврориным, Ю.А.Трутневым, Р.И.Илькаевым, а также главными конструкторами ядерных зарядов и боеприпасов А.Н.Сенькиным, А.А.Бришем, С.Н.Вороныным, Г.Н.Дмитриевым и Б.В.Литвиновым в публикации «Ядерная» Украина играет с огнем» перечислили эти недостатки [150]. Они отмечают, что аварии, связанные с нарушениями в хранении и обслуживании ядерных боеприпасов, могут привести к последствиям, сравнимым с масштабами чернобыльской катастрофы. Кроме того, на Украине нет ни квалифицированных кадров, ни мест и условий для разборки и демонтажа ядерных боеприпасов. «Дальнейшее нахождение ядерных боеприпасов в условиях, созданных на Украине, совершенно недопустимо. Мы обращаем слова тревоги к народам, правительствам, парламентам Украины, России, всех стран Европы, Азии и Америки: необходимо предотвратить вероятную катастрофу, обязать украинских политиков перестать играть с огнем, принять единственно верное решение о вывозе ядерных боеприпасов в Россию для уничтожения».

Не анализируя позицию других стран, на территории которых размещены ядерное оружие и делящиеся материалы, используемые в ядерных реакторах, ниже остановимся лишь на отдельных аспектах ядерной безопасности. Как следует из опубликованных данных, на территории СНГ во всех видах боеприпасов находится >20 тыс. ядерных боеголовок, содержащих десятки тонн плутония и несколько сотен тонн высокообогащенного ^{235}U . Значительная часть этих материалов находится в стратегических наступательных вооружениях (табл. 41).

Кроме указанных в табл. 41 делящиеся материалы из обогащенного ^{235}U находятся в твэлах различного вида судов с ядерными установками. Заводы по получению обогащенного ^{235}U , изготовлению твэлов и ТВС, а также радиохимические заводы расположены на территории России. Ядерное топливо в виде таблеток из UO_2 (для всех АЭС) производится в Казахстане (г. Усть-Каме-

Таблица 41

**Размещение основных количеств делящихся материалов
в видах техники
в странах СНГ и Литве [151, 152]**

Государство	Стратегические наступательные вооружения		АЭС, ГВт	Исследовательские реакторы
	Число видов	Число боезарядов		
Россия	4	7449	21,3	25
Украина	2	1408	12,9	1
Казахстан	2	1360	0,15	2
Беларусь	1	54	—	1
Литва	—	—	2,5	—

ногорск). В Латвии, Грузии и Армении в исследовательских реакторах использовался высокообогащенный ^{235}U . В табл. 41 нет полных данных о всех количествах делящихся материалов, не приведены число боезарядов, находящихся в тактическом ядерном оружии, размещенном на территории указанных государств, и количество урана и плутония в выгруженном из реакторов ядерном топливе. Только на Украине в 1992 г. находилось 2605 тактических ядерных боеголовок [151]. Во всех вышеназванных (см. табл. 41) исследовательских ядерных реакторах [152] в твэлах находится в основном ^{235}U с обогащением до 90%.

^{235}U и ^{239}Pu находятся в различных критических стендах и подкритических системах. Проведенное в конце 1993 г. обследование более двухсот ядерно- и радиационно опасных предприятий России показало:

- рост количества отработавшего ядерного топлива в хранилищах при АЭС снижает ядерную безопасность;
- ядерно-энергетические установки кораблей военно-морского и гражданского флота эксплуатируются зачастую с отступлением от действующих правил ядерной безопасности.

В материалах обследования отмечалось, что на учете в Госатомнадзоре России находится 116 исследовательских реакторов, критических сборок и подкритических стендов. Главный вывод проверки предприятий Минатома, Роскомобороны, Минобороны, РНЦ «Курчатовский институт» и других ведомств: «Состояние ядерной и радиационной безопасности в Российской Федерации нельзя признать удовлетворительным» [153].

В ядерном топливе для реакторов АЭС (ВВЭР-440, ВВЭР-1000, РБМК) ^{235}U содержится в пределах 1,8–4,6% и обращение с ним представляет (с позиций ядерной безопасности) существенно меньшую опасность. Однако, как будет показано ниже, в определенных условиях тоже могут возникать самопроизвольные цепные

ядерные реакции. На территории России, где находятся централизованные предприятия, накоплен большой опыт и решены многие проблемы по обеспечению ядерной и радиационной безопасности при обращении с делящимися материалами. Учитывая, что материалы, используемые в ядерном оружии, имеют очень большую ценность, объяснимо желание Украины использовать их в своих интересах, в частности в ядерном топливе. Однако создание на Украине своих производств по разборке-демонтажу ядерного оружия, как отмечают руководители федеральных ядерных центров России и известные создатели отечественного ядерного оружия, могут планировать только безответственные политики: «Ни один профессионал, если он ответственный житель нашей планеты, не возьмется за разборку ядерного боеприпаса, разработанного в другой стране по неизвестной технологии».

Украина, как известно, не желала отказываться от своего ядерного арсенала и уже нашла поддержку в ряде стран. Как отмечал министр иностранных дел Канады на совещании 53 стран СБСЕ [154], его страна верит Киеву, что Россия не сможет предоставить твердых гарантий уничтожения ядерного оружия, вывезенного с Украины. Канада готова быть посредником на переговорах по решению этой проблемы. Уместно отметить, что разработчики ядерных боеприпасов под их уничтожением понимают демонтаж боеприпаса и уничтожение всех его главных компонентов, кроме плутония и ^{235}U . Оставшиеся делящиеся материалы уже не являются боеприпасом и могут храниться, или использоваться, например, как топливо для ядерных реакторов на тепловых и быстрых нейтронах.

На пути освоения атомной энергии в России и в других ядерных странах было много трагических моментов. Одни из них связаны с уникальной способностью ядерных материалов вступать в самопроизвольную цепную реакцию, сопровождающуюся большими дозами радиации и выбросом радионуклидов. Эти реакции могут возникнуть в материалах, находящихся в любых агрегатных состояниях — твердом, жидком и газообразном. Основным условием возникновения самопроизвольной цепной реакции является достаточное для образования критической массы ($M_{кр}$) количество делящегося материала в системе. При этом безопасное количество материала зависит не только от концентрации его в растворе (газе или в твердом материале), но и от вида и размера емкости, в которой он находится. Поэтому в атомной промышленности существуют такие понятия, как ядерно-безопасная геометрия оборудования и ядерно-безопасная концентрация делящихся материалов. Самопроизвольная цепная реакция возникает тогда, когда число нейтронов в конкретной системе лавинообразно (мгновенно) возрастает, т.е. когда эффективный коэффициент размножения

нейтронов ($K_{эф}$) в системе с делящимися материалами становится ≥ 1 . Для взрыва ядерного устройства создаются условия, при которых $K_{эф} > 1$. В ядерных реакторах условия поддерживаются такими, чтобы $K_{эф}$ был приблизительно равен 1.

Определение критических масс таких материалов, как ^{235}U , ^{239}Pu и ^{233}U , было проведено еще в период разработки ядерного оружия. Критическим состоянием системы (самоподдерживающаяся цепная ядерная реакция) называют такое состояние, когда в системе с делящимися материалами количество нейтронов остается неизменным. Это может быть только при условии, когда поглощение нейтронов и их утечка равняются количеству нейтронов, возникающих в ядерном реакторе при делении ядер ^{235}U , ^{239}Pu или ^{233}U . При таком условии $K_{эф} = 1$. Выявляется такое состояние экспериментально двумя способами:

- путем критических экспериментов, когда в реакторе создают условия для $K_{эф} \geq 1$;
- подкритическими опытами, когда тщательно измеряют поток нейтронов на стенде (критической сборке) в зависимости от увеличения загрузки делящихся материалов. При этом достигается только приближение к критической массе.

Во втором случае $K_{эф} < 1$ и точность определения критичности зависит от степени приближения эксперимента к $K_{эф} = 1$.

Вначале, как в США, так и в СССР, критическую массу определяли только на природном уране. В качестве замедлителя нейтронов в этих экспериментах использовали сначала графит, а затем тяжелую воду (табл. 42). В СССР первые критические эксперименты систем природный уран–тяжелая вода проводились в 1949 г. под руководством академика А.И.Алиханова* в лаборатории № 3.

Тяжеловодные реакторы по сравнению с графитовыми имеют ряд особенностей:

- **сравнительно малый размер системы**, приводящий к большой утечке нейтронов и высоким значениям коэффициента их размножения (K_{∞});
- **малое количество столкновений**, необходимых для замедления нейтронов;

* В 1934–1936 гг. А.И.Алиханов вместе с А.И.Алиханьяном, М.С.Козодаевым, Л.А.Арцимовичем открыли образование электронно-позитронной пары в результате внутренней конверсии энергии возбужденного ядра, экспериментально доказали сохранение энергии и импульса при аннигиляции электрона и позитрона. А.И.Алиханов – автор работ по физике космических лучей и физике элементарных частиц.

- образование вторичных нейтронов по реакции $D(\gamma, n)H$;
- высокая стоимость тяжелой воды.

Это заставило научного руководителя разработок тяжеловодных реакторов А.И.Алиханова с особой тщательностью выбирать оптимальные параметры тяжеловодной критической сборки — первого опытного тяжеловодного реактора. Конструкция тяжеловодного реактора для определения $M_{кр}$ урановых металлических стержней длиной 160 и 162,5 см с диаметрами от 2,2 до 2,8 см и шагом решетки в тяжелой воде от 6,3 до 16,26 см подробно описана в докладе ИТЭФ, представленном на Международную Женевскую конференцию по мирному использованию атомной энергии в 1955 г. [112]. Критическая масса достигалась за счет постепенного увеличения уровня тяжелой воды в загруженную урановыми стержнями систему. В табл. 43 приведены значения критических масс и объемов 6 сборок урановых стержней в тяжелой воде. Как видно из табл. 43, минимальная загрузка урана соответствует решеткам с шагом 12,7 и 16,26 см. Причем в опыте, когда критическая масса составила 107 стержней (их диаметр 2,2 см), в системе был верхний — торцевой отражатель из D_2O толщиной 12 см. В табл. 43 приведены также значения K_{∞} для таких реакторов без отражателя. Во всех случаях в критической системе значение K_{∞} умноженное на коэффициент, характеризующий утечку нейтронов (p), будет определять значение $K_{эф} = K_{\infty} \cdot p = 1$. Знание минимальных

Таблица 42

Значения критических масс в первых исследовательских реакторах на природном уране [105, 112]

Реактор, страна	Год пуска	$M_{кр}$, т	Замедлитель, т	Мощность	Средний поток тепловых нейтронов, $см^{-2} \cdot с^{-1}$
СР-1, США	1942	46	Графит, 385	100 Вт	$4 \cdot 10^6$
СР-2, США	1943	52	«, 472	2 кВт	$1 \cdot 10^8$
СР-3, США	1944	3	Тяжелая вода, 6,5	300 кВт	$5 \cdot 10^{11}$
Х-10, США	1943	35	Графит, 620	3800 кВт	$5 \cdot 10^{11}$
Ф-1, СССР	Декабрь 1946	45,1	«, 450	1000 кВт*	$4 \cdot 10^7$
Тяжеловодный, СССР	Апрель 1949	$1,25^{*2}$	Тяжелая вода, $4,18^{*3}$	До 500 кВт	$2 \cdot 10^{12}$

* При больших пусках максимальная мощность достигала 3860 кВт.

²Диаметр урановых стержней — 2,2 см при их длине 162,5 см и шаге квадратной решетки 12,7 см. Критический уровень D_2O — 174,5 см.

³Реактор имел графитовый отражатель с боковой и наружной поверхности бака из алюминия (диаметр — 175 см, толщина стенок и дна — 3–3,2 мм).

значений критических масс систем уран–D₂O было необходимым условием создания не только более совершенного опытного тяжеловодного реактора, но и промышленных тяжеловодных реакторов, которые вскоре были построены на комбинате № 817 для получения сначала плутония, а затем таких изотопов, как ²³³U и тритий.

Таблица 43

**Критические параметры для систем уран–D₂O,
полученные в лаборатории № 3**

Параметр	Критические сборки с ураном природного обогащения					
Диаметр урановых стержней, см	2,8	2,8	2,8	2,2	2,2	2,2
Шаг квадратной решетки, см	11,5	13,8	16,26	9	12,7	6,3
Число стержней	120	120	86	272	107	292
Критический уровень D ₂ O в реакторе, см	131	120	148	118,5	174,5	181,6
Длина урановых стержней, см	160	160	160	162,5	162,5	162,5
Критический объем D ₂ O*, м ³	3,09	2,78	3,52	2,764	4,175	4,104
Объем активной зоны, м ³	2,02	2,64	3,28	2,52	2,86	*2
Коэффициент размножения, вычисленный из известных тогда ядерных констант	1,214	1,244	1,258	1,195	1,241	1,071

* Включена водяная прослойка внизу и сбоку реактора.

*2 Часть объема была занята решеткой с шагом 9 см.

Общие проблемы безопасности в начальный период создания атомной промышленности

Развитие атомной промышленности сначала в США, а затем в СССР было связано с созданием ядерных реакторов, сравнимых по мощности с крупнейшими гидростанциями. Разница была лишь в том, что в отличие от последних первые промышленные реакторы, созданные для наработки плутония, всю свою энергию растрачивали на нагревание реки Колумбии в США и озера Кызыл-Тяш в Челябинске-40. Признавая, что урановый реактор олицетворяет собой самое гениальное достижение разума за всю историю человечества, выдающийся английский радиохимик Ф. Содди еще тогда писал: «Страшно подумать, в какие неподготовленные руки наука столь преждевременно вложила силы, немногим более четырех лет назад казавшиеся бесконечно недоступными» [2].

Первые предприятия, перерабатывавшие облученный в ядерном реакторе уран и выделенный из него плутоний (заводы Б и В), сразу же столкнулись с трудными проблемами ядерной и радиационной

безопасности. Из-за отсутствия плутония не было и экспериментальных данных о его минимальных критических массах, как в растворах, так и в других формах. Это вынуждало выбирать нормы загрузки плутония в оборудование с большим запасом, на основании только приближенных расчетных данных. Однако эти большие запасы иногда оказывались лишь кажущимися и не гарантировали от возникновения самопроизвольной цепной реакции.

Несколько другие проблемы существуют и при получении высокообогащенного ^{235}U .

В промышленных и экспериментальных ядерных реакторах нарабатываются наряду с плутонием сотни миллионов кюри радионуклидов. Поэтому необходимо обеспечить не только ядерную, но и радиационную безопасность, как для производственного персонала, так и для населения. На предприятиях по получению высокообогащенного урана проблемы радиационной безопасности практически отсутствуют.

Особую опасность представляют случаи, когда создаются ситуации, приводящие к неуправляемому разгону ядерного реактора любого типа. Последствия могут быть катастрофическими не только для прилегающей к реактору территории, но и для больших регионов. Гораздо меньшую опасность представляют случаи несоблюдения ядерной и радиационной безопасности в научных центрах, имеющих исследовательские ядерные реакторы, опытные критические сборки, ускорители заряженных частиц, радиохимические лаборатории и другие установки, в которых используются источники излучений. На предприятиях и в учреждениях, где применяются только источники радиоактивного излучения, ядерной опасности не существует. Здесь необходимо обеспечить радиационную безопасность.

Происшедшие в мире с 1944 по 1988 г. ядерные и радиационные аварии, связанные с выбросом радионуклидов в окружающую среду, распределены следующим образом (аварии в СССР в данной статистике не учтены):

- возникновение самопроизвольных критических масс на физических установках и в химических процессах — 18;
- выход радионуклидов из изолированных источников излучений, включая ускорители заряженных частиц и другие установки, — 209;
- утечка радиоактивных изотопов, включая актиниды, тритий, продукты деления урана и плутония, — 59.

В большинстве случаев имеются пострадавшие и даже погибшие [155, 156]. В табл. 44 приведены данные о числе пострадавших при нарушениях ядерной и радиационной безопасности, числе пострадавших при авариях на Южном Урале (29 сентября 1957 г.) и на Чернобыльской АЭС (26 апреля 1986 г.), а также при авариях

Таблица 44

Последствия ядерных и радиационных аварий [155, 156]

Число аварий (место)	Число пострадавших	Число получивших большие дозы облучения	Число погибших на месте происшествия
294 (в мире)	1371	633	37
1 (ЧАЭС)	135000	24200*	28
1 (комбинат № 817)	14100* ²	6000* ²	—
1 (Бразилия)	244	20	4
Всего...297	150715	25733	69

* В том числе 237 чел. получили более 100 бэр.

²Включены только лица, получившие дозу облучения >44 бэр, 6 тыс. чел. получили дозы >100 бэр. К числу пострадавших отнесено население, эвакуированное с территорий, где загрязненность >3,3 Ки/км².

в Бразилии, когда порошок ¹³⁷Cs из ампулы специального источника распространился на значительной части г. Гояна.

В первые годы создания атомной промышленности ядерная и радиационная безопасность не могли быть надежно обеспечены. Ранее отмечалось, что урановые блоки в промышленном реакторе разрушались по целому ряду причин. На других заводах, работавших с делящимися материалами, технологические процессы были столь же несовершенны. Поэтому практически на всех таких предприятиях пуск заводов и цехов, а также их эксплуатация в первые годы осуществлялись более опытными специалистами из научно-исследовательских и конструкторских организаций. Многие из них переводились без принуждения, по собственному желанию, на постоянную работу в цеха и лаборатории предприятий.

На заводах и в институтах тогда действительно трудились с большим энтузиазмом. Ведь делали все впервые и самостоятельно, а безопасность эксплуатационного персонала в основном должна была обеспечиваться за счет жесткой технологической и исполнительской дисциплины, которая сохранилась еще с военного времени и распространялась на научных руководителей проектов, главных конструкторов и технологов, на административных руководителей всех уровней. Но люди работали не только на совесть, но и из-за страха. Был введен строгий контроль и примеры снятия с работы, а иногда и отдачи под суд не были столь уж редки. Однако отсутствие некоторых данных, особенно о значениях критических масс растворов и других соединений плутония и урана, приводило к тому, что работа технологов на ряде заводов была связана с большим риском. Перестраховки при выборе норм загрузки делящихся материалов в технологическое оборудование из-за отсутствия многих экспериментальных данных были неизбежны и в значительной мере оправданны, хотя и не всегда могли обеспечить ядерную безопасность.

Первые ядерные аварии при работе с делящимися материалами

Известно, что первая неконтролируемая цепная ядерная реакция произошла в США в 1945 г., еще до взрыва плутониевой бомбы (на полигоне в Амарильо) 16 июля 1945 г. При изучении влияния эффективности отражателя нейтронов из карбида вольфрама в двух плутониевых полусферах (на стенде в Лос-Аламосе) общей массой 6,2 кг, которые были покрыты никелем толщиной 0,13 мм, произошла мгновенная вспышка цепной реакции (без разрушения и взрыва). Сферу из плутония (плотность $15,7 \text{ г/см}^3$) экспериментатор вручную обкладывал кубиками отражателя из карбида вольфрама. Добавление очередного кубика привело к самопроизвольной цепной реакции, т.е. мгновенно произошло 10^{16} делений ядер плутония. Для прекращения самопроизвольной цепной реакции экспериментатор разрушил сборку руками. Он получил дозу 800 Р и умер через 28 дней [64]. Это был не единственный случай в Лос-Аламосе. В 1946 г. на тех же плутониевых полусферах проверялась эффективность отражателя из бериллия. Регулируя зазор между полуоболочками из бериллия, физик-экспериментатор неосторожно их внезапно соединил. При этом возникла критическая масса и произошла нейтронная вспышка. Выделилась энергия самопроизвольной цепной реакции, эквивалентная $3 \cdot 10^{15}$ делений, доза облучения составила 900 Р. Ученый умер через 9 дней. В 1958 г. в Лос-Аламосе произошла авария при очистке и извлечении плутония из скрапа. В сосуде объемом 196 л содержался плутоний с концентрацией $\leq 0,1 \text{ г/л}$. Его ошибочно перелили в другую емкость диаметром 96,6 см, объемом 850 л, в которой уже находилось примерно 300 л водно-органической эмульсии плутония. Добавление 196 л раствора, содержавшего азотную кислоту, привело к разделению фаз. В верхнем слое раствора в объеме примерно 330 л оказалось 3,27 кг плутония, но критической массы еще не было. Однако после включения мешалки в первый момент нижний слой раствора прижался к стенкам емкости, а верхний — занял освободившееся место и принял форму, близкую к сферической, что и явилось причиной аварии. При самопроизвольной цепной реакции произошло $1,5 \cdot 10^{17}$ делений плутония. Из 3 чел., находившихся вблизи емкости, погиб оператор, получив дозу 12 тыс. Р. Двое получили дозу 134 и 12 Р.

В работе [64] проанализированы 19 аварий, из них 17 произошли в США. Аварии происходили, кроме Лос-Аламоса, в Ок-Ридже, Айдахо, Ханфорде. По одной аварии произошло на опытных реакторах в Канаде (1952 г.) и в Югославии (1958 г.). Причем на тяжеловодной критической сборке — реакторе, загружаемом стержнями природного урана, из-за ошибок при контроле уровня заполне-

ния емкости жидкостью (D_2O) произошла самопроизвольная цепная реакция. При аварии выделилась энергия 80 МВт·с, что эквивалентно $2,6 \cdot 10^{18}$ делений. Шесть человек, находившихся вблизи установки, получили следующие дозы облучения: 400, 700, 850, 850 и 1100 бэр. Один из них вскоре умер.

В нашей стране первая цепная управляемая ядерная реакция, как известно, была осуществлена в 18 ч 25 декабря 1946 г. на критической уран-графитовой сборке в лаборатории № 2. Критическая масса составила 45,1 т металлического урана природного обогащения в основном в виде блоков диаметром 35 мм, загруженных в графитовые ячейки с шагом 200 мм. В апреле 1949 г. в лаборатории № 3 была получена управляемая ядерная реакция в системе уран- D_2O , $M_{кр}^{мин} \sim 1,2$ т. Цепная реакция (на мгновенных нейтронах) с взрывом плутониевой бомбы была осуществлена рано утром 29 августа 1949 г.

Предварительных опытов (в нашей стране) по определению критической массы не только металлического плутония*, но даже растворов плутония и обогащенного урана до 1951 г. не проводилось. Поэтому нормы загрузки делящихся материалов на заводах Б и В комбината № 817 в начальный период выбирались исходя из расчетных значений критических масс плутония, получаемых в ЛИПАНе, и устанавливались лично И.В. Курчатовым. За соблюдение этих норм загрузки в технологическое оборудование, не допускающее возникновения самопроизвольной цепной реакции и переоблучения персонала, должны были бы отвечать, кроме директоров и главных инженеров заводов Б и В, соответственно, и научные руководители этих заводов.

Через 4 года с начала работы завода Б комбината № 817 произошла первая ядерная авария. Возникла самопроизвольная цепная реакция 15 марта 1953 г. в отделении (№ 26) выдачи конечного продукта с радиохимического завода Б на завод В [157]. Среди двоих пострадавших был начальник планово-производственного отдела завода А.А. Каратыгин, который в тот воскресный день был вызван на завод для дежурства и подготовки контейнеров для приемки в отделение № 26 готовой продукции – растворов плутония. Вот как он описывает создавшуюся перед аварией ситуацию [157]: «За ночь должны были выйти несколько партий продукта, а емкостей для них не было. Пришлось занимать дополнительные... Я решил использовать только одну из них. Себе в помощь я позвал начальника смены отделения Г. Акулову². Все манипуляции были мне хорошо знакомы. Все

* Взрывом бомбы 29 августа 1949 г. была подтверждена $M_{кр}$ плутониевых сфер, используемых в США.

² Е.П. Славский ошибочно вместо Г. Акуловой называет другую участницу (А.А. Тыманюк) [116], которая работала заместителем начальника отдела на заводе Б комбината, а затем начальником радиохимического отдела в НТУ Минсредмаша. Сейчас на пенсии.



**АЛЕКСАНДР
АЛЕКСАНДРОВИЧ
КАРАТЫГИН
(1914–1988) —**

начальник планово-производственного
отдела завода Б
комбината № 817

закончил, освободил приемники для ночных партий. Дальнейшие события произошли за долю секунды. Только я снял шланг, как одновременно засветилось голубое холодное пламя, меня как будто пронизал электрический ток, и забурлило в емкости, из штуцера со свистом начал выходить пар». Поняв, что произошла самопроизвольная цепная реакция, А.А.Каратыгин не покинул место аварии, а принял меры, обеспечивающие передачу части раствора с плутонием в другую емкость, чем и прекратил цепную ядерную реакцию. Причиной аварии послужило то, что в одной из емкостей был неучтенный продукт (предположительно в количестве около 650 г плутония). По проведенным позднее оценкам, при самопроизвольной цепной реакции произошло $2 \cdot 10^{17}$ делений. Доза, полученная А.А.Каратыгиным, была примерно 1000 Р, а Г.Акуловой приблизительно 100 Р. После аварии А.А.Каратыгин остался жив, но длительное время болел.

В своих воспоминаниях, написанных в 1974 г. [158], А.А.Каратыгин подробно остановился на ходе болезни, лечении в больнице № 2 в Челябинске-40 и больнице № 6 3 ГУ при Минздраве СССР в Москве. После лечения он работал в ЦЗЛ комбината, техническим редактором отдела научно-технической информации. Впоследствии он освоил машинопись, и не только редактировал, но и печатал материалы в домашних условиях. В 1961 г. по предложению Е.П.Славского семья А.А.Каратыгина переехала в г. Обнинск. А.А.Каратыгин вел активный образ жизни и постоянно поддерживал связь с комбинатом и с некоторыми работниками министерства. Кроме того, в воспоминаниях А.А.Каратыгин подробно описывает обстановку, существовавшую тогда на заводе, и отношение глав-

ного инженера комбината Г.В.Мишенкова и руководителей завода «Б» Б.В.Громова, М.А.Демьяновича, М.В.Гладышева, Н.С.Наумова и других работников завода к неучтенным продуктам и отчетным данным, отражающим потери плутония и его наличие в оборудовании: «Работа идет неравномерно. Имели место успехи и провалы, поэтому всегда нужно было иметь резерв на будущий месяц на случай срыва, и в случае успешного завершения месяца следует оставлять запас на следующий. Эта политика с отчетностью не была тайной для руководства. Все понимали, что иначе нельзя, но об этом было не принято говорить».

Главный инженер комбината Г.В.Мишенков и директор завода Б.В.Громов, как отмечается в воспоминаниях, очень положительно реагировали, когда после успешного выполнения плана по выдаче плутония на заводе Б оставался «жирок». Вот этот припасенный жирок и оказался роковым (привел к возникновению самопроизвольной цепной реакции). Причины образования на заводах неучтенных делящихся материалов связаны были в первую очередь с чрезвычайным режимом секретности и борьбой за выполнение плана выдачи конечного продукта. Сейчас кажется абсурдным, что эти плановые задания заводу по выпуску плутония в самый начальный период не были известны ни заместителю главного инженера М.В.Гладышеву, ни даже научному руководителю завода профессору А.П.Ратнеру, которые в первую очередь отвечали за ведение технологических процессов, за потери и извлечение плутония и обеспечение техники безопасности [43]^{*}. Немаловажная роль при этом принадлежала и возможному поступлению в отдельных партиях урановых блоков из-за разбросов мощностей (в небольших количествах) избыточного плутония с промышленных реакторов. Это было связано в тот период тоже с отсутствием некоторых экспериментальных данных у научных руководителей проблемы. Кроме того, была недостаточная точность аналитических и дистанционных методов контроля на радиохимическом производстве.

Авария, впервые зафиксированная на химико-металлургическом производстве завода В, произошла 21 апреля 1957 г. В камере цеха № 1 в горизонтально расположенном монжусе возникла самопроизвольная цепная реакция при подаче небольшого количества ^{235}U 90%-го обогащения с ядерно-безопасной концентрацией (несколько граммов на литр). Причиной аварии послужило накопление в горизонтально расположенном монжусе осадка, содержащего 3,4 кг ^{235}U 90%-го обогащения. Форма и предполагаемое расположение осадка и поступившего раствора оказались достаточными для возникновения самопроизвольной цепной реакции. Рассмотрение причин, вызвавших эту аварию, показало, что в торцах монжуса, где была меньшая

* Такая же обстановка была и на заводе В.

скорость движения раствора с продуктом, происходило постепенное осаждение урана.

При накоплении осадка, содержащего ^{235}U , добавление раствора в монжус даже с разрешенной нормой загрузки делящегося материала вызвало самопроизвольную цепную реакцию. Выделенная энергия была эквивалентна 10^{17} делениям ядер ^{235}U . Пострадало 6 чел. Оператор умер через 12 дней, а остальные перенесли лучевую болезнь. После этой аварии были сокращены промежутки между промывкой всего оборудования цеха: они стали проводиться через 10–15 дней. Степень полноты очистки оборудования от делящихся материалов необходимо было надежно контролировать. Для обеспечения контроля за ядерной безопасностью на заводах Б и В, кроме научных руководителей, были введены должности заместителей главных инженеров по научной работе. Ими работали в начальный период М.И.Ермолаев (завод Б), М.А.Баженов (завод В).

В публикации В.Фролова [158] отмечалось, что с 1953 по 1987 г. на 3 промышленных предприятиях (комбинатах № 816 и 817, заводе № 12) произошло 13 ядерных аварий, из них две (комбинат № 817 и завод № 12) — на критических стендах. Кроме указанных аварий единичные самопроизвольные цепные реакции происходили и на специальных физических сборках и стендах в головных институтах (Институте атомной энергии им. И.В.Курчатова и в ФЭИ).

Одно из главных условий обеспечения ядерной безопасности, не допускающее возникновения самопроизвольной цепной реакции, — контроль за нормами загрузки делящихся материалов, а это связано с необходимостью знаний минимальных значений критических масс в технологическом оборудовании заводов и хранилищ, в транспортных контейнерах, а также в активных зонах всех видов ядерных реакторов.

Минимальные критические массы и размеры ядерно-безопасного оборудования

Во всех производствах, имеющих дело с делящимися материалами, потенциально существует опасность возникновения самопроизвольной цепной реакции. Неожиданность их возникновения, особенно в оборудовании технологических цепочек промышленных предприятий, приводит к недопустимому большому радиационному воздействию облучения на персонал, часто с трагическими последствиями. Самопроизвольные цепные реакции в первые годы освоения атомных технологий возникали при нарушениях процессов, в основном из-за недостаточной их изученности.

При пуске первого в стране радиохимического и химико-металлургического заводов на комбинате № 817 экспериментальных данных

о значениях $M_{кр}$ растворов плутония еще не было. Теоретические же расчеты по определению значений $M_{кр}$ для многочисленного оборудования завода, где находились растворы плутония, были чрезмерно приближенными. Ситуация осложнялась еще и тем, что материалы технологических аппаратов, их форма и размеры, а также концентрация плутония в растворе могли изменить значения $M_{кр}$ в десятки раз. Неизвестны тогда были и предельные размеры ядерно-безопасного оборудования и минимальные концентрации плутония в растворе, при которых в любом объеме невозможно возникновение $M_{кр}$, т.е. обеспечивается ядерная безопасность (возникновение самопроизвольной цепной реакции исключено). Поэтому часть производимого в промышленных аппаратах плутония (после передачи нужного количества для выполнения основной задачи — изготовления бомб) использовалась на специальных установках и стендах для определения критических масс различных соединений плутония, как в виде растворов, так и в виде твердых соединений и даже чистого металла.

Учитывая, что параллельно с плутонием на комбинатах № 813 и 817 организовывалось производство высокообогащенного ^{235}U и изделий из него, знание критических масс и для этого делящегося материала было также необходимо. Таким образом, в первые годы становления атомной промышленности из-за недостатка научных знаний опасность возникновения самопроизвольной цепной реакции в оборудовании была велика.

До 1955 г. никаких открытых публикаций о проведении у нас в стране экспериментов по проблемам ядерной безопасности и определению значений $M_{кр}$ в различных условиях не было. Однако, как позднее стало известно, в Челябинске-40 на Плутониевом комбинате, уже в 1950–1951 гг. проводились первые эксперименты с растворами ^{235}U и ^{239}Pu . К тому времени плутоний и ^{235}U в достаточном количестве были выделены для организации работ по определению критических масс*. Опыты проводились в специально построенном стендовом корпусе на расстоянии примерно 1 км от промышленного реактора А, в так называемых «Березках», около созданного позднее ОКБ и Приборного завода — объекта 40. Руководил всеми опытами непосредственно И.В.Курчатов, практически постоянно проживавший тогда в Челябинске-40. Как отмечают Б.Г.Дубовский и Г.Н.Флёров, в экспериментах кроме них участвовали Я.Б.Зельдович, Е.А.Доильницын, Н.А.Дмитриев, Е.Д.Воробьев, И.Е.Кутиков, С.М.Поликанов [11, 144]. Для обслуживания работ на стенде привлекались и работники комбината.

Основной задачей было определение критических масс растворов ^{235}U и ^{239}Pu в сферических емкостях. Использовался ^{235}U 75%-го

* Научному руководству были известны данные о размерах и критических массах не только металлического плутония, но и ^{235}U .



**ГЕОРГИЙ
НИКОЛАЕВИЧ
ФЛЁРОВ**
(1913–1990) —
академик с 1968 г.,
начальник
лаборатории в КБ-11,
директор лаборатории
в Объединённом
институте
ядерных исследований

обогащения в виде раствора $\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2$ с концентрациями 92,2, 184,3 и 368,7 г/л. ^{239}Pu в виде раствора $\text{Pu}(\text{NO}_3)_4 \cdot 2\text{HNO}_3$ в опытах имел концентрацию 38,4 и 316 г/л. Сферические сосуды из алюминия и нержавеющей стали имели диаметр от 150 до 300 мм. Для каждой сферы были изготовлены сферические отражатели нейтронов различной толщины с внешним диаметром 500 мм из таких материалов, как парафин, графит, алюминий, железо, свинец, природный уран. В центре сферы устанавливался источник нейтронов, рост умножения нейтронов при заполнении сфер раствором контролировался специальной пусковой аппаратурой. Начиная с колб — сфер малого диаметра последовательное заполнение раствором других сфер позволяло получить $M_{\text{кр}}$ сферического объема раствора для каждой концентрации с различными отражателями нейтронов. В табл. 45 приведены результаты полученных значений $M_{\text{кр}}$ в первых проведенных в стране опытах. Как вспоминает участник этих экспериментов, сотрудник комбината № 817 В.Н.Нефедов (впоследствии был переведен в Димитровград в НИИАР), при выводе системы на нулевую мощность, т.е. на критический объем, за пультом установки, как правило, был лично И.В.Курчатов. Иногда он в своем присутствии разрешал за пультом находиться и А.П.Виноградову, ответственному тогда в основном за организацию аналитического контроля на радиохимическом заводе, без которого нельзя было обеспечить безопасное ведение технологического процесса и проверку извлечения плутония.

Важнейший результат этих экспериментов — установление минимальной критической массы плутония в растворе (510 г). Это давало возможность более

Таблица 45

**Значения критических объемов и масс
для водных растворов ^{235}U и ^{239}Pu
в сферических емкостях с урановым отражателем**

Критический параметр	^{239}Pu , г/л		^{235}U , г/л		
	38,4	316	92,2	184,3	368,7
Объем, л	13,3	11,1	11,7	9,75	9,5
Масса, г	510,0	3180,0	1080,0	1800,0	3510,0

обоснованно устанавливать допустимые нормы загрузки плутония в оборудование. Однако для обеспечения ядерной безопасности и эффективного использования технологического оборудования при обращении с делящимися материалами необходимо знание ряда дополнительных данных. Главные из них:

- концентрация делящихся материалов в растворе; влияние на величину $M_{кр}$ формы технологических аппаратов (конус, цилиндр и др.) и наличия различного вида отражателей (вода, сталь и др.);
- однородность распределения по высоте аппаратов плутония и различных примесей в растворах и наличие делящегося материала в осадке, на стенках емкости;
- возможность превышения норм загрузки делящегося материала в технологические емкости (в 2–3 раза), как при ошибках персонала, так и при других непредвиденных обстоятельствах (течь арматуры, ошибки при анализах и др.);
- степень влияния загрузки делящихся материалов на критические параметры «рядом» находящихся аппаратов или контейнеров с конечной продукцией.

Почти такие же данные необходимы при обращении с делящимися материалами, находящимися в металлической форме или в виде других соединений.

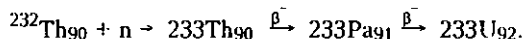
Как вспоминал В.С.Емельянов, при организации производства изделий из металлического ^{235}U для ядерного оружия необходимо было получить с диффузионного завода уран в форме газа, шестифтористого соединения урана и газ превратить в металл. Перед отъездом на завод И.В.Курчатов назвал В.С.Емельянову значение критической массы в 10 раз ниже расчетной. Такой запас им был выбран из опасения, что кто-либо из руководителей при проверке эффективности технологического процесса единолично примет решение и допустит увеличение загрузки ^{235}U в несколько раз: «...Мы должны были выпустить газообразное соединение урана в раствор и получить в осадке твердое вещество. В осадке мог начаться процесс ядерного деления. Не обязательно сразу взрывного характера, ... и мощный поток нейтронов нас бы облучил».

Во время работы с примитивными мерами предосторожности при выпуске газа из баллонов в раствор для сокращения времени ведения технологического процесса В.С.Емельянов допустил только более чем четырехкратное превышение названной И.В.Курчатовым «крит-массы» при загрузке ^{235}U , и самопроизвольная цепная реакция не произошла. Вот с такими запасами, при отсутствии экспериментальных данных выбирались тогда нормы загрузки делящихся материалов в технологическое оборудование [11].

В 1951 г. в Челябинске-40 на стенде в «Березках» экспериментально определялись первые критические массы не только разбавленных гомогенных систем, но и гетерогенных, состоящих из пластин с делящимися материалами. Отношение водорода к урану было в пределах 2,6–52. При этих соотношениях критический объем ^{235}U изменялся от 2,6 до 3,7 л, а критическая масса, соответственно от 9 до 1,2 кг [144].

Позднее в связи с пуском реакторов, загружаемых урановыми блоками, обогащенными ^{235}U , под руководством Е.Д. Воробьева* на комбинате № 817 были созданы стенды, на которых сотрудники комбината определяли значения минимальных критических масс для изотопного реактора АИ с магниево-керамическими блоками с 2%-м обогащением по ^{235}U . Для создаваемого в НИИАРе реактора СМ-2 в 1956 г. на комбинате определялись предварительные значения $M_{\text{кр}}$ с твэлами в виде пластин 90%-го обогащения по ^{235}U при разных соотношениях урана и воды. До 1958 г. на комбинате проводились опыты по определению $M_{\text{кр}}$ и с растворами урана 90%-го обогащения и плутония в емкостях различной формы. Изучалась при этом эффективность гетерогенных кадмиевых поглотителей. В дальнейшем эксперименты были продолжены в других организациях и институтах на специально сооруженных стендах с обеспечением всех предъявляемых тогда требований ядерной и радиационной безопасности.

В специально изданном справочнике [64] были обобщены результаты отечественных и зарубежных экспериментов и приведены значения минимальных критических масс для ^{233}U , ^{235}U , ^{239}Pu , (табл.46) для водных систем. ^{233}U получается в ядерных реакторах из природного тория по известной реакции:



Периоды полураспада ^{233}Th и ^{233}Pa – 23,5 мин и 27,5 сут соответственно.

Как и плутоний, ^{233}U из облученных в ядерном реакторе ториевых блоков извлекают по специально разработанной технологии на радиохимическом заводе. При наработке ^{233}U в ядерном реакторе будет

* В последнее время работал в Дубне в Объединенном институте ядерных исследований.

образовываться и другой, особенно нежелательный изотоп — ^{233}U , который не только загрязняет ^{233}U , но и существенно ухудшает радиационную обстановку при использовании искусственно полученных делящихся материалов. Соблюдение приведенных в табл. 46 значений гарантирует безопасное ведение технологических процессов в водных растворах. При значениях параметров, меньше указанных в табл. 46, самопроизвольная цепная реакция не возникает. Так, если концентрация плутония в оборудовании всегда меньше 9,3 г/л, то $M_{\text{кр}}$ не образуется. Данные табл. 46 получены при наличии водяного отражателя толщиной около 10 см.

При выборе безопасных размеров оборудования и количеств делящихся материалов следует учитывать их взаимное влияние в расположенных рядом емкостях или трубопроводах, а также наличие в них поглощающих нейтроны примесей. Приведенные значения $M_{\text{кр}}$ (см. табл. 46) получены для сферических емкостей. При цилиндрической форме емкости $M_{\text{кр}}$ зависит не только от концентрации делящихся материалов в растворах, но и от диаметра сосуда. Для каждого диаметра сосуда существуют свои минимальные значения критической массы и объема в зависимости от концентрации урана или плутония в активной зоне реактора. Если раствор UO_2F_2 с обогащением ^{235}U , равным 93%, будет находиться в цилиндре диаметром 20,3 см (с полным отражателем из воды), изготовленном из нержавеющей стали, то $M_{\text{кр}}^{\text{мин}}$ будет равна примерно 1,4 кг, а для активной зоны цилиндрического реактора диаметром 16,5 см $M_{\text{кр}}^{\text{мин}}$ будет 3,2 кг; при диаметре, меньшем 13,7 см, достичь критической массы невозможно.



**ЕВГЕНИЙ
ДМИТРИЕВИЧ
ВОРОБЬЕВ**
(1922—1994) —
заместитель
научного
руководителя
комбината № 817,
затем заместитель
главного инженера
комбината № 817
по научной работе

Таблица 46

**Минимальные значения критических параметров
водных растворов**

Критический параметр	²³⁵ U	²³³ U	²³⁹ Pu
Минимальная концентрация, г/л	11,0	10,9	9,37[64]
Критическая масса, г	820	590	510
Диаметр бесконечного цилиндра, см	13,7	11,2	12,4
Толщина бесконечной пластины, см	4,3	3,0	3,3
Критический объем, л	6,3	3,3	4,5

Для систем из металлических соединений делящихся материалов с отражателем из воды критические параметры приведены в табл. 47. Плотность урана – 18,8 г/см³, плотность плутония в α-фазе – 19,6 г/см³, а в δ-фазе – 15,8 г/см³.

Таблица 47

Критические параметры делящихся веществ в виде металлов

Критический параметр	²³⁵ U	²³³ U	²³⁹ Pu	
			α-фаза	δ-фаза
Масса сферы, кг	22,8	7,5	5,6	7,6
Диаметр бесконечного цилиндра, см	7,8	4,8	4,3	5,3
Толщина бесконечной пластины, см	1,5	0,7	0,6	0,7

Критический объем сферы из металлического плутония с водяным отражателем составляет всего 0,3 л [64]. Однако при наличии отражателя из бериллия минимальная критическая масса металлического плутония уменьшается более чем в 2 раза (плотность бериллия – 1,84 г/см³, плутония – 19,25 г/см³) и достигает 2,47 кг.

Влияние отражателей из природного урана на $M_{кр}$ металлического урана различного обогащения по ²³⁵U и различных его плотностей показано на рис. 40 и 41. На рис. 42 показана эффективность отражателей из различных материалов (Al, Fe, C, H₂O, D₂O). При использовании отражателя из тяжелой воды критическая масса сферического реактора из ²³⁵U 93,5%-го обогащения изменяется с 48,0 до 13 кг. Следует отметить, что критическая масса сильно растет с уменьшением обогащения. При обогащении ²³⁵U ниже 5% критическая масса металлического урана превращается в бесконечность.

Совсем другие значения критических масс и объемов систем уран–вода в зависимости от обогащения ²³⁵U можно видеть на рис. 43. При обогащении ²³⁵U, равном 0,7–0,8%, достичь $M_{кр}$ невозможно. Экспериментально установлено, что при 3%-м обогащении урана и ниже $M_{кр}$ урана уменьшается, когда он размещен в замедлителе в виде решетки

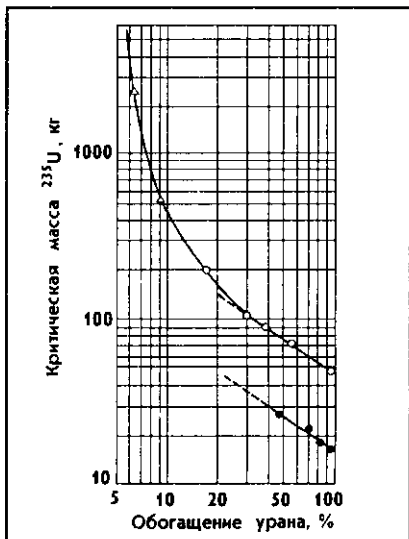


Рис. 40. Зависимость критической массы ^{235}U от обогащения урана для сферической активной зоны (плотность урана — $18,8 \text{ г/см}^3$):

- — с толстым отражателем из природного урана;
- , △ — без отражателя;
- , ○ — критические эксперименты;
- △ — экспоненциальные эксперименты

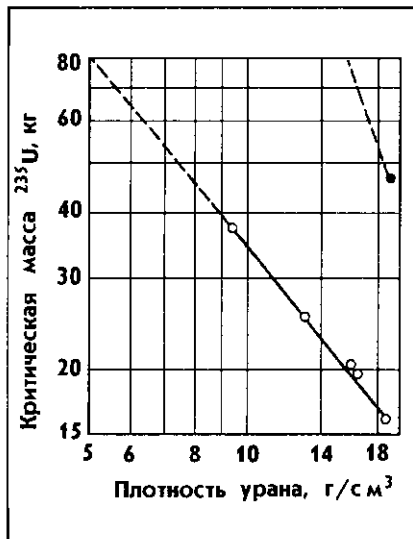


Рис. 41. Зависимость критической массы ^{235}U от плотности урана (обогащение урана 90%; форма активной зоны — сфера):

- — с толстым отражателем из природного урана (плотность $18,8 \text{ г/см}^3$);
- — без отражателя

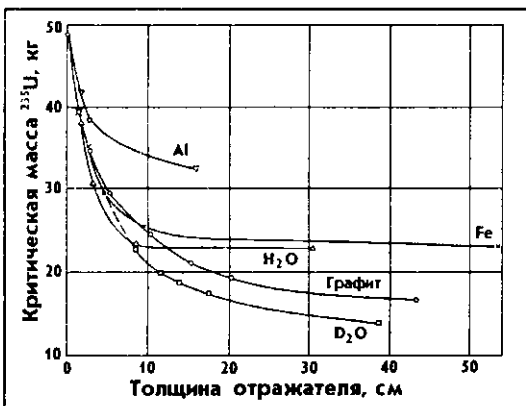


Рис. 42. Зависимость критической массы ^{235}U от толщины отражателя (плотность урана — $18,8 \text{ г/см}^3$, обогащение — 93,5%; форма активной зоны — сфера)

(гетерогенно). Максимальное обогащение, при котором происходит уменьшение критической массы в гетерогенных системах, $\geq 5\%$. Приведенные на рис. 43 закономерности (кривая 3), полученные в эксперименте, охватывают обогащение ^{235}U , содержащегося в твэлах и ТВС всех реакторов типа РБМК и ВВЭР, и поэтому, как для свежего, так и облученного ядерного топлива, операции хранения, транспортировки, как с заводов — изготовителей твэлов, так и с АЭС на радиохимическую переработку, являются ядерно-опасными. Для проведения указанных работ установлены предельные нормы на всех технологических операциях обращения с обогащенным ураном.

Из данных рис. 44 видно, что при изменении обогащения ^{235}U от 1 до 6% минимальный критический объем в системе с отражателем изменяется с 300 до 20 л, а при обогащении 90–100% в системах с отражателем может уменьшиться примерно до 6 л.

На рис. 45 приведены обобщенные данные, позволяющие для различных обогащений ^{235}U в водных растворах выбирать ядерно-безопасные размеры цилиндрических емкостей.

Невозможность осуществления цепной ядерной реакции также в гомогенных системах с природным ураном при замедлителях нейтронов из графита и бериллия. Однако в гомогенной системе природный уран–тяжелая вода при отношении количеств ядер дейтерия к ядрам урана около 400 цепная ядерная реакция возможна. Для высокообогащенного ^{235}U цепная ядерная реакция возможна даже при условиях, когда объемная доля урана в таких материалах, как графит, вода, тяжелая вода и бериллий, составляет 0,01–0,1%. Эти закономерности можно видеть на рис. 46, где приведены значения $M_{кр}$ для гомогенной сферической активной зоны без отражателя. Такие малые концентрации высокообогащенного урана характерны в первую очередь для металлургических производств, где при литье, например, используются графитовые тигли, а их бой — отходы металлургического производства нужно не только безопасно хранить, но и перерабатывать.

Критические массы и объемы всех без исключения систем уменьшаются при увеличении плотности делящихся материалов, как в растворах, так и в любых других агрегатных состояниях.

Из данных табл. 42 и рис. 42, 46 очевидно, что самые минимальные значения $M_{кр}$ характерны для систем с тяжелой водой и бериллием. Кроме малых сечений захвата нейтронов (для ^2H , это сечение равно 0,46 мб) ядра дейтерия, ^9Be , при взаимодействии с γ -квантами и нейтронами испускают вторичные нейтроны, увеличивая размножающие свойства делящихся материалов. Так, для быстрых нейтронов сечение реакции (n , $2n$) для ^2H равно 0,1–0,2 мб, а у ^9Be даже на тепловых нейтронах — 0,2–0,3 мб [120].

Основные данные о минимальных значениях $M_{кр}$, объемах и ядерно-безопасных размерах емкостей для всех диапазонов плотно-

Рис. 43.
Минимальные критические массы урана для систем уран-вода в зависимости от обогащения урана:

1,2 – предельное обогащение для решеток и гомогенных систем соответственно;
3 – решетки с водяным отражателем;
4 – гомогенные системы с водяным отражателем;
5 – то же без отражателя

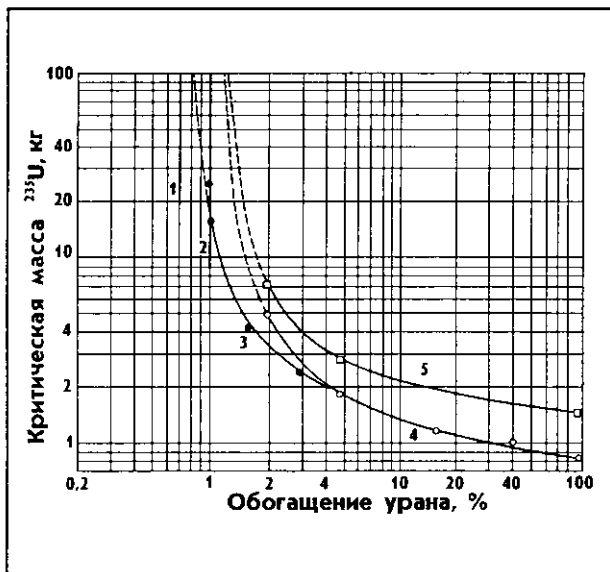
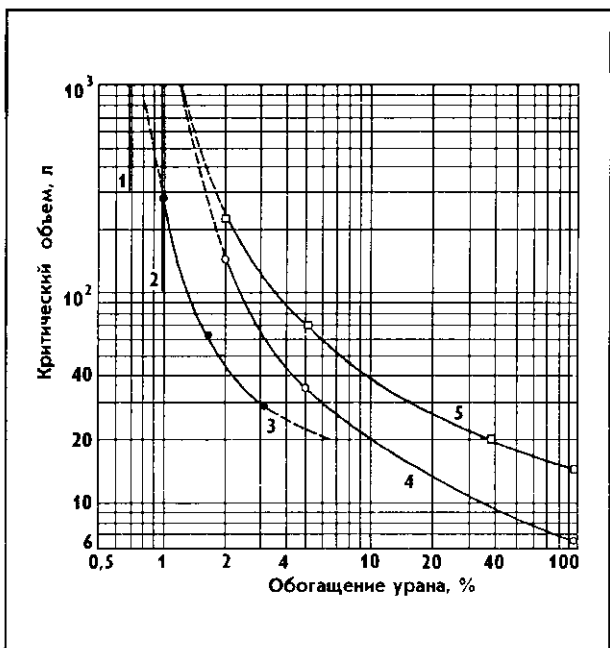


Рис. 44.
Минимальные критические объемы для уран-водных систем в зависимости от обогащения урана:

1,2 – предельное обогащение для решеток и гомогенных систем соответственно;
3 – решетки с водяным отражателем;
4 – гомогенные системы с водяным отражателем;
5 – то же без отражателя



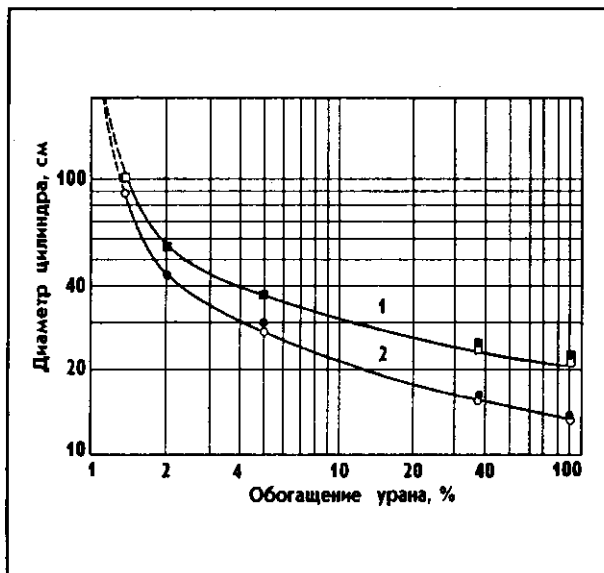


Рис. 45.
Минимальные критические диаметры бесконечных цилиндров для водных растворов урана в зависимости от обогащения урана:
1 – без отражателя;
2 – с водяным отражателем

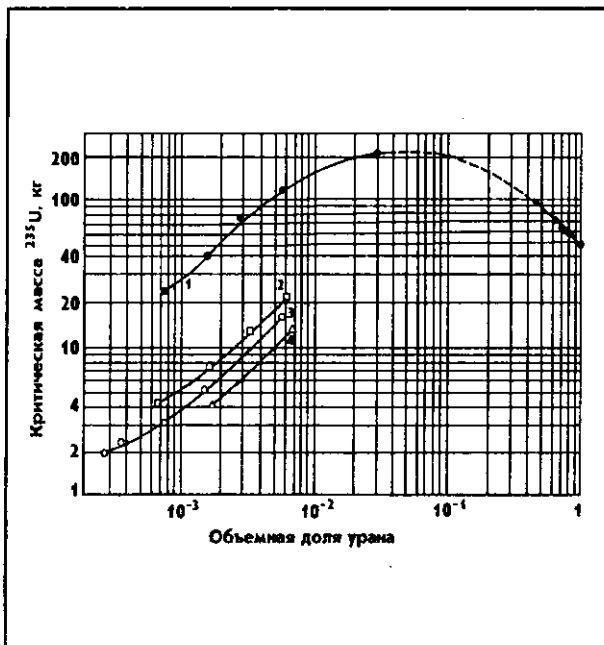


Рис. 46.
Критическая масса ^{235}U в зависимости от объемной доли урана 93%-го обогащения при плотности $18,8 \text{ г/см}^3$ в гомогенной смеси с некоторыми веществами (форма активной зоны – сфера без отражателя):
1 – графит при плотности $1,67 \text{ г/см}^3$;
2 – D_2O при плотности $1,11 \text{ г/см}^3$;
3 – BeO при плотности $2,86 \text{ г/см}^3$;
4 – бериллий при плотности $1,85 \text{ г/см}^3$

сти делящихся материалов, включая растворы и металлы, в настоящее время хорошо известны.

Для систем без замедлителей нейтронов при одновременном одинаковом изменении плотности активной зоны и отражателя, или при изменении плотности активной зоны в отсутствие отражателя, критическая масса делящегося изотопа изменяется обратно пропорционально квадрату плотности [64].

Все изложенное указывает, что безопасное ведение технологического процесса на АЭС, базах Министерства обороны, на кораблях и базах ВМФ, заводах и в институтах, работающих с делящимися материалами, требует знания как критических масс, так и надежного контроля за распределением указанных материалов. По всем стадиям технологического процесса этот контроль нужно осуществлять в каждом аппарате, в каждом отстойнике, в каждом хранилище и контейнере (при хранении и транспортировке) и даже в системах вентиляции и, безусловно, в сбросных растворах и на складах при хранении полупродуктов и готовых изделий из изотопов урана и плутония.

В 1958–1959 гг. в ФЭИ была создана специальная лаборатория для разработки норм загрузки делящихся материалов в различные оборудование (транспортные контейнеры, хранилища и др.), обеспечивающее ядерную безопасность. Первым начальником лаборатории был назначен Б.Г. Дубовский. Лаборатория оснащена необходимыми стендами, на которых можно определять критические массы различных соединений делящихся материалов. Практически тогда же у научного руководителя проблемы И.В. Курчатова (в Институте атомной энергии) было создано подразделение по ядерной безопасности, которое возглавил Т.Н. Зубарев.

Аварийные ситуации наиболее опасны, когда из-под контроля выходят работающие на мощности ядерные реакторы.

Ядерная и радиационная безопасность при эксплуатации реакторных установок

Во всех производствах при работе с делящимися материалами для ядерного оружия в конкретных видах оборудования разных технологических процессов их количество, как правило, не превышало минимальной критической массы ($M_{кр}^{мин}$). В ядерных же реакторах, особенно большой мощности (реакторы АЭС), загрузка делящихся материалов в активную зону реактора иногда в десятки раз больше ($M_{кр}^{мин}$). Поэтому проблема управления ядерными реакторами является важнейшей наряду с процессами отвода тепла и эффективного использования ядерного топлива, т.е. оптимального выгорания топлива. Специфика эксплуатации ядерного реактора связана с наличи-

ем в нем больших количеств радиоактивных веществ. Причем даже в исследовательских реакторах малой мощности количество продуктов деления исчисляется миллионами кюри.

Как видно из табл. 48, даже в реакторе мощностью 250 МВт сразу после его остановки активность исчисляется примерно 10^9 Ки. Так как 1 Ки испускается 1 г радия, то в большом реакторе тепловой мощностью в несколько гигаватт эта радиоактивность эквивалентна тысячам тонн радия. Поэтому разрушение активной зоны любого реактора всегда опасно.

Таблица 48

Мощности запаздывающего тепловыделения и радиоактивность после нормального прекращения работы реактора [159]

Время после остановки реактора, с	Предварительная устойчивая мощность реактора, кВт			
	300		250000	
	Мощность тепловыделения, кВт	Активность, Ки	Мощность тепловыделения, кВт	Активность, Ки
10	12,9	$2,1 \cdot 10^6$	11000	$1,8 \cdot 10^9$
10^2 (1,7 мин)	8,0	$1,3 \cdot 10^6$	6800	$1,1 \cdot 10^9$
10^3 (16,7 мин)	5,2	$8,4 \cdot 10^5$	4300	$7,0 \cdot 10^8$
10^4 (2,8 ч)	3,3	$5,3 \cdot 10^5$	2700	$4,4 \cdot 10^8$
10^5 (28 ч)	2,0	$3,3 \cdot 10^5$	1700	$2,8 \cdot 10^8$

Аварии с разрушением активной зоны Чернобыльской АЭС (ЧАЭС), посвящено много публикаций. Остановимся на малоизвестных авариях, происшедших как на отечественных реакторах в начальный период их эксплуатации, так и за рубежом.

Принято считать, что утечка радиоактивности из реактора связана с тремя видами аварийных ситуаций:

- надкритической ядерной реакцией и выходом реактора из-под контроля;
- плавлением отдельных деталей реактора и твэлов даже после прекращения цепной реакции вследствие остаточного запаздывающего тепловыделения;
- возможностью экзотермических химических реакций с конструкционными материалами самого реактора.

Причины возникновения указанных ситуаций рассматривались еще в 1955 г. на Международной Женевской конференции по мирному использованию атомной энергии. Все три вида аварийных ситуаций разной степени тяжести имели место в начальный период эксплуатации отечественных промышленных реакторов, особенно на комбинате № 817. Так, на реакторе АИ (начальник Ф.Е. Логиновский, главный

инженер П.В.Глазков) при замене стержней СУЗ была допущена ошибка. В находящемся на автоматическом регулировании реакторе (мощность 1%), вместо подлежащего замене канала поглотителя техником службы КИПиА был вручную выдернут из активной зоны центральный стержень. Произошел кратковременный неуправляемый всплеск мощности, но при этом поглощающий нейтроны стержень сразу же упал в свою ячейку, и процесс остановился. Разрушения урановых блоков и выхода радиоактивности не было. Переоблучения персонала не произошло.

На другом реакторе – ОК-180 (научный руководитель А.И.Алиханов, руководители объекта А.А.Тарасов и И.Д.Дмитриев) была создана аварийная ситуация, когда выгружаемые из активной зоны после облучения урановые блоки застряли в технологическом тракте. Из-за остаточного тепловыделения они сплавилась с материалом контура разгрузочной петли. Реактор был остановлен. Для ликвидации последствий этой аварии были разработаны специальные мероприятия. В работах участвовали специалисты комбината № 817 и других организаций. Опыт демонтажа оборудования на этом реакторе был рассмотрен в специальной публикации [117].

Случаи сильного разогрева (оплавления) урановых блоков в каналах реактора и в разгрузочных емкостях («кюбелях») наблюдались в первом уран-графитовом промышленном реакторе [160].

Аварийные ситуации, связанные с возможностью экзотермических химических реакций между материалами активной зоны реактора, были не единичны. Сплавление урана с графитом, так называемые «козлы», в начальный период работы реакторов было практически на всех уран-графитовых реакторах. Некоторые примеры сплавления урана с другими материалами активной зоны приведены в известных публикациях по авариям на Белоярской АЭС в 1964–1979 гг.

Обеспечению радиационной безопасности уделялось большое внимание с первых лет становления атомной промышленности. По мере накопления опыта совершенствовались методы и техника обеспечения радиационной безопасности. Одной из самых радиационно-опасных и сложных работ была разборка активной зоны уран-графитового реактора, построенного для наработки трития. Эта уникальная операция в целях замены части графитового замедлителя была проведена на комбинате № 817 в начале 50-х гг. на реакторе АИ. Реактор АИ – графитовый с вертикальным расположением технологических каналов. Технологические каналы, оболочки урановых блоков и мишеней для наработки необходимых изотопов выполнялись из алюминия. Охлаждающая вода подавалась сверху и вниз на сливе из технологического канала, имела температуру 80–90°C. Проектная мощность реактора составляла 50 МВт; как отмечалось в работе [161], аппарат предназначался для наработки важного про-

дукта — трития. Использовалось ядерное топливо на основе обогащенного металлического урана. Металлический уран, содержащий 2% ^{235}U в виде зерен равномерно распределялся в металлической матрице из магния. Магний, слабо поглощающий нейтроны, был выбран физиками ЛИПАНа, которые и проектировали — выдавали исходные данные для активной зоны этого реактора. Технология изготовления дисперсионных уран-магниевых блоков была разработана Р.С.Амбарцумяном и А.М.Глуховым. Эти блоки из магниевой керамики предварительно были испытаны на реакторе А комбината № 817. Однако после загрузки в реактор АИ сразу после ввода реактора в эксплуатацию (декабрь 1951 г.) блоки дисперсионного типа стали разрушаться из-за нарушения герметичности алюминиевых оболочек блоков. По расчетам физиков, такие дисперсионные блоки были идеальными, так как магний практически не поглощает нейтроны, и в реакторе эффективно использовались «государственные» нейтроны. Термином «беречь государственные нейтроны» часто пользовались И.В.Курчатов и его заместитель В.С.Фурсов. Из 248 ячеек реактора АИ только 140 ячеек были загружены такими урановыми блоками. Общая масса урана в реакторе — 3 т. Вскоре из-за нарушения герметичности оболочек урановых блоков к сердечникам твэлов стала поступать вода, что приводило к их разрушению, горению магния и сплавлению его и урана с графитом и далее к радиационному загрязнению не только помещений реактора, но и основного технологического водоема — озера Кызыл-Тяш. Учитывая, что загрузка и выгрузка блоков осуществлялись через верх реактора, даже единичные случаи разрушения блоков приводили к загрязнению центрального зала реактора и других помещений. Особенностью этого опытно-промышленного реактора являлось то, что при проектировании и монтаже предусматривалась возможность его разборки. Хотя реактор работал на средней мощности (50 МВт), максимальная плотность потока тепловых нейтронов достигала $4,5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$. Температура графита в центре активной зоны реактора доходила до 400–500°C, что приводило к выгоранию графита, особенно при попадании воздуха в кладку.

Радиационная безопасность при восстановлении реактора АИ

Разрушения отдельных урановых блоков приводили к возникновению существенных дефектов в графитовой кладке реактора, что создавало сложную радиационную обстановку. По предложению И.В.Курчатова руководством Минсредмаша было принято решение частично разобрать этот реактор, изучить изменение свойств графита

и заменить разрушенные кирпичи (200х200х600 мм) графитовой кладки реактора. Не останавливаясь на технологии разборки реактора, отметим, что основная работа была выполнена в 1956 г. эксплуатационным персоналом объекта. К измерениям деформации и размеров разрушения графитовых кирпичей привлекались сотрудники ЦЗЛ комбината, в основном из реакторной лаборатории № 5. Руководителем группы лаборатории, внесшим тогда максимальный вклад в изучение свойств облученного графита, был В.И.Клименков*. Мощность дозы γ -излучения в различных зонах реакторного пространства после разгрузки реактора и извлечения графитовых колонн измерялась под руководством начальника дозиметрической службы Б.М.Долишнюка. В реакторном пространстве после разгрузки урана мощность дозы достигала 200 Р/ч [146].

Руководители завода 156, в составе которого был реактор АИ (директор Ф.Я.Овчинников, главный инженер Б.В.Брохович), имели большой опыт организации работ в условиях высоких радиационных полей. Почти все работы по частичной замене графитовой кладки реактора АИ проводились дистанционно с учетом опыта работ на первом и других реакторах комбината № 817. На реакторе АИ работали специалисты, имевшие опыт освоения первого реактора А. Среди них были:

Ф.Е.Логиновский — начальник реактора АИ, прошедший путь на реакторе А от заместителя начальника смены до главного инженера;

П.В.Глазков — главный инженер реактора АИ, до этого работавший главным энергетиком реактора А;

А.Г.Мешков² — заместитель главного инженера, работавший с первых дней на реакторе А, сначала в должности дежурного инженера КИПиА;

Ю.К.Гуськов — заместитель научного руководителя реактора АИ;

Б.М.Долишнюк — начальник дозиметрической службы реактора АИ;

В.И.Шевченко — начальник экспериментальных петель на реакторе АИ, с самого начала работавший начальником дозиметрической лаборатории реактора А.

* И.В.Курчатов называл В.И.Клименкова своим единственным аспирантом. Впоследствии В.И.Клименков был переведен в НИИАР, где руководил материаловедческими исследованиями.

² Впоследствии работал в Томске-7 на комбинате № 816, главным инженером и директором комбината № 815 в Красноярске, начальником 16 ГУ, заместителем министра и первым заместителем министра среднего машиностроения СССР.



**ФЕДОР
ЯКОВЛЕВИЧ
ОВЧИННИКОВ**
(1925–1994) —
директор
завода 156,
затем директор
Нововоронежской
АЭС,
заместитель
министра энергетики,
генеральный
директор
международного
хозяйственного
объединения
«Интератомэнерго»

Все они, и особенно Ф.Я.Овчинников и Б.В.Брохович, вместе с работниками смен и служб реактора АИ обеспечили слаженную работу в условиях высоких радиационных полей. Опыт разборки реактора был первым в мировой практике. Несмотря на высокие радиационные поля среднее облучение занятого в работе персонала было в норме. Предельно допустимым уровнем тогда считалось значение 0,05 Р за рабочий день.

Всего было извлечено 40 графитовых колонн с общим числом кирпичей примерно 400. 21 колонна была из пораженных районов графитовой кладки, и эти кирпичи были детально обследованы. Кроме изменений формоизмерений кирпичей были проведены исследования изменения теплопроводности графита, электросопротивления, прочности в зависимости от плотности потока нейтронов, их энергии и температуры графита. После проведения монтажных работ и исследований графитовой кладки реактор АИ успешно работал до 1987 г. Полностью он был выведен из эксплуатации 25 мая 1987 г., т.е. через 36 лет после начала работы.

Аварии с потерей управления реактором

Наиболее опасными авариями на ядерных реакторах являются аварии, когда теряется контроль над управлением цепной ядерной реакцией из-за наличия избыточной размножающей способности его активной зоны. Это превышение эффективного коэффициента размножения над единицей называют реактивностью, и если превышение составляет 2–3%, может произойти катастрофический разгон реактора с разрушением активной зоны и даже паровым взрывом. Для оценки

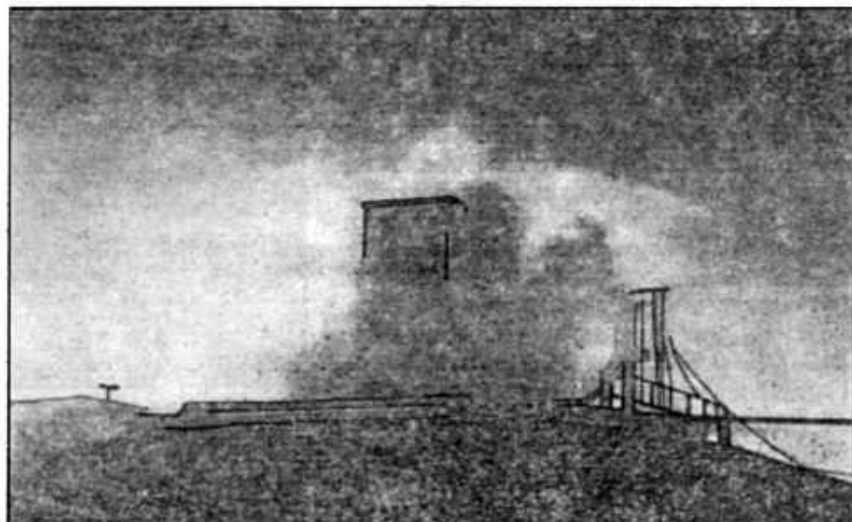
степени опасности таких разгонов и последствий взрывов (реакторов) при неограниченном возрастании мощности* в 1953–1954 гг. в США были проведены опыты на разрушение двух специально построенных для этого реакторов. На рис. 47 (кадр из киносъемки) показаны эти последствия: представлен выброс воды и пара из гетерогенного реактора (а) с пластинчатыми твэлами, а другой гомогенный реактор (б) также был разрушен. Период удвоения мощности реакторов находился в интервале 0,0026–0,005 с, т.е. за 1 с мощность возрастала в сотни раз. В результате такого «выброса мощности» пиковое давление составило около 700 атм, твэлы расплавились, а их обломки были разбросаны в радиусе >100 м. Значения избыточной реактивности, равные 2,1 и 3,3% $K_{\text{эф}}$, указывают, что разгон мощности происходил на мгновенных нейтронах. Если в реакторе внезапно высвобождается реактивность, равная доле так называемых запаздывающих нейтронов или больше ее, то происходит неуправляемый разгон реактора, который приводит к частичному или даже полному его разрушению. В реакторе, работающем на ^{235}U , 99,24% нейтронов мгновенные (испускаются мгновенно после деления, т.е. за 10^{-5} с), запаздывающих же нейтронов испускается лишь 0,76% (табл. 49). С учетом времени их запаздывания (вылет после деления) увеличивается время длительности следующего цикла рождения новых мгновенных нейтронов². Этого времени до-



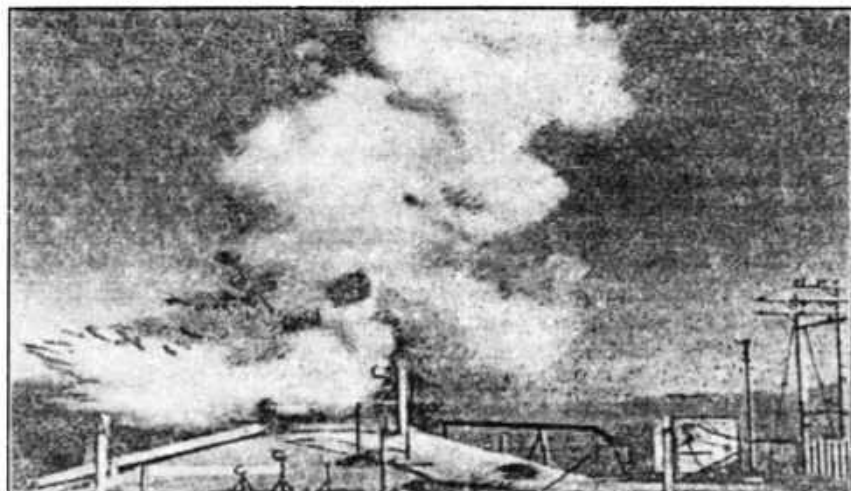
**БОРИС
ВАСИЛЬЕВИЧ
БРОХОВИЧ** —
главный инженер
завода 156,
директор завода,
директор
комбината № 817

* Возрастание мощности ограничивалось уровнем, когда реактор разрушался, т.е. переходил в подкритическое состояние с разбросом активной зоны.

² Запаздывающие нейтроны образуются из продуктов деления. Они были открыты Э.Ферми в 1941 г., который указал на их важнейшую роль для контроля интенсивности делений при управлении — регулировании цепной реакции в ядерном реакторе [162].



а



б

Рис. 47. Последствия резкого увеличения реактивности реактора с водяным замедлителем: а – разрушение реактора вследствие расплавления тепловыделяющих пластин при избыточной реактивности, равной 3,3% Кэф; б – разрушение реактора в результате выброса воды при избыточной реактивности, равной 2,1% Кэф

статочно для создания системы управления реактором. Если обозначить долю запаздывающих нейтронов коэффициентом β , то уравнение

$$K_{\text{эф}}(1-\beta) \leq 1$$

будет характеризовать состояние реактора, когда он будет управляемым, и разгона на мгновенных нейтронах не произойдет.

Таблица 49

Запаздывающие нейтроны
(при делении ядер ^{235}U и ^{239}Pu тепловыми нейтронами)

Номер группы	Время запаздывания, с	Доля β_i для ^{235}U	Энергия нейтронов, МэВ	Доля β_i для ^{239}Pu
1	0,114±0,010	0,0003	0,30	—
2	0,439±0,006	0,00083	0,42	0,00040
3	2,11±0,03	0,0024	0,62	0,00105
4	5,5±0,08	0,0021	0,43	0,00112
5	19,78±0,19	0,0017	0,56	0,00094
6	54,31±0,33	0,00026	0,25	0,00012
Среднее число запаздывающих нейтронов, %		0,759		0,363

Однако реактор, в котором $K_{\text{эф}}(1-\beta)=1$, называют мгновенно-критическим, так как он может находиться в критическом состоянии благодаря одним мгновенным нейтронам. Даже с учетом запаздывающих нейтронов среднее время жизни нейтронов в реакторе при $K_{\text{эф}}=1,0076$ будет приблизительно 10-3 с и управлять реактором практически невозможно [163], так как за 1 с мощность может возрасти примерно в 1000 раз. Поэтому управление в реакторах, работающих на ^{235}U за счет запаздывающих нейтронов, осуществляется, когда $1 \leq K_{\text{эф}} \leq 1,0076$. При значениях $K_{\text{эф}}=1,021$ и $1,033$, как видно на рис. 47, реакторы были мгновенно разрушены. Как отмечается в работе [164], давление газов, образовавшихся в результате контакта расплавленного металла с водой, вызвало разрушение корпуса реактора и выброс содержимого защитного корпуса в воздух. Приведенные фотографии обломков и пластин расплавленных твэлов взорванного реактора напоминают о таких же обломках твэлов, выброшенных при катастрофической аварии на ЧАЭС, произошедшей из-за потери управления реактором. Опыты со взрывом реакторов в США проводили на свежем урановом топливе, и поэтому после взрыва загрязнение окружающей территории было незначительным. Через 15 мин после взрыва общая мощность дозы от β - и γ -излучений на высоте 0,9 м от земли, в точке, удаленной от места взрыва на 1,28 км, с подветренной стороны реактора составляла 5 мР/ч. В момент взрыва мощность дозы γ -излучения на расстоянии 0,8 км, где

располагался пульт управления реактором, составляла 0,4 Р/ч. Цепная ядерная реакция прекратилась в самой начальной стадии взрыва. В то же время высокоскоростная киносъемка зафиксировала световую вспышку в момент достижения реактором наивысшей мощности, но вспышка эта погасла прежде, чем выбрасываемый материал успел подняться над защитным корпусом. Вспышка продолжалась 0,003 с. Проведенный тогда опыт подтвердил, что световая вспышка не только сопровождает ядерные и термоядерные взрывы, но может быть и при катастрофических авариях на ядерных реакторах.

На рис. 48 воспроизведена запись временного хода увеличения, практически мгновенного, мощности реактора, температуры твэла и давления [164]. Примерно за 0,015 с в опыте на разрушение реактор взорвался. В опытах на разрушение были использованы устройства, позволяющие извлекать стержень, регулирующий мощность реактора, примерно за 0,2 с. Минимальный период возрастания мощности в опытах оказался равным 0,0026 с. Указанные опыты были использованы для обоснования безопасной работы как гомогенных реакторов, так и реакторов с твердым топливом при выборе систем управления, учитывающих наличие запаздывающих нейтронов.

Разгон на мгновенных нейтронах был зарегистрирован и на отечественном реакторе. 7 мая 1986 г. в НИИАРе (на АЭС с кипящим ядерным реактором) произошло неуправляемое увеличение

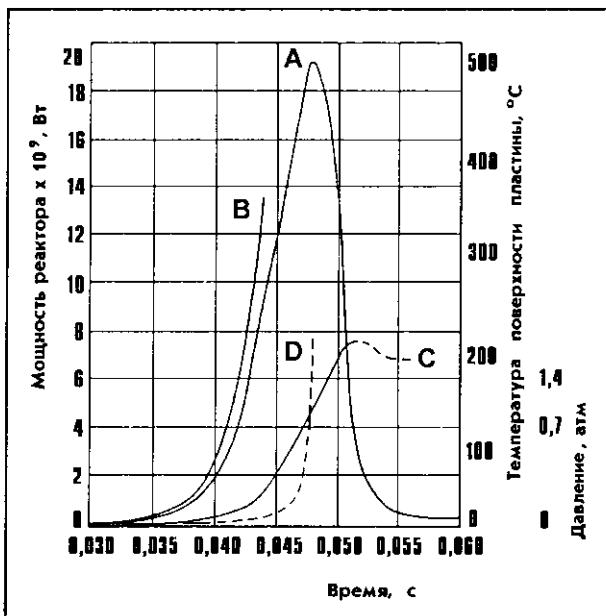


Рис. 48. Записи опыта на разрушение:
А — мощность реактора;
В — температура поверхности тепловыделяющей пластины;
С — температура поверхности тепловыделяющей пластины, расположенной вне активной зоны реактора;
D — запись показаний датчика давления, не откорректированных на запаздывание гальванометра. Время отсчитывается от произвольного начала

мощности [165]. Облучились дозиметрист и начальник смены АЭС. В работе [165] перечислены и некоторые другие радиационные аварии, которые происходили в нашей стране с 29 сентября 1957 г. по 27 июня 1985 г., а также 12 аварий, происшедших в США в период с 1951 г. по 1986 г. Большинство этих аварий не связаны с неуправляемыми увеличениями и мощностей ядерных реакторов.

Ядерная безопасность реакторов при локальной критичности

В реакторах большой мощности, работающих на обогащенном уране, внутри активной зоны, как правило, в суммарной загрузке урана содержится по несколько самостоятельных локальных реакторов. В работе [166] при рассмотрении локальной критичности ВВЭР, у которых в активной зоне в твэлах (начальная загрузка) обогащение ^{235}U изменяется от 1,5 до 4,4%, отмечалось, что таких самостоятельных реакторов может быть более 15-ти. В зависимости от мощности реактора и длительности кампании в работающем («горячем») реакторе таких локальных критических масс из-за выгорания ^{235}U становится меньше и они могут даже полностью отсутствовать.

На физических стендах были изучены критические размеры штатных ТВС (кассет) с твэлами, содержащими двуоксид урана различных обогащений. Как видно из табл. 50, в первых отечественных ВВЭР лишь 6–19 кассет образуют критическую массу.

Таблица 50

Размеры минимальных критических масс локальных реакторов

Показатель	ВВЭР-1		ВВЭР-440	
Обогащение ^{235}U в топливе, %	1,5	2,0	1,6	3,6
Число кассет, образующих критическую массу	19	11	16	6
Критическая масса урана, кг	2200	1250	1920	720

Кассеты размещали в воде с расстояниями между ними, как и в активной зоне реактора. Опыты проводились при температуре 20°C. Отражателем нейтронов была вода.

В реально работающем реакторе ТВС загружаются с твэлами, имеющими различное обогащение урана. Кроме того, по мере выгорания ^{235}U для последующей подпитки реактора, т.е. поддержания неизменной размножающей способности активной зоны, в реактор загружаются кассеты с твэлами более высоких обогащений. Поэтому потенциальная возможность образования критических масс в активной зоне реактора возрастает. В табл. 51 приведены значения средних и максимальных обогащений ^{235}U в топливе.

Таблица 51

Обогащение топлива в ВВЭР, %

Обогащение топлива	ВВЭР-1	ВВЭР-3	ВВЭР-440	ВВЭР-1000
Среднее, первой загрузки	1,62	2,05	2,5	3,05
Максимальное проектное, в стационарном режиме перегрузки	2,0	3,0	3,6	4,4

Значительное число локальных реакторов может быть и в реакторах типа РБМК, когда управление ведением процесса на реакторе идет с нарушением технологической дисциплины. При их возникновении неизбежно разрушение или перегрев твэлов, находящихся в центре такого реактора. О ликвидации козла бригадой слесарей-ремонтников в одной из центральных ТВС вышедшего из-под контроля локального уран-графитового реактора (примерно 25 ТВС) подробно рассказывает в своей книге ветеран атомной промышленности Г. Медведев [165]. В работе [165] отмечается, что этот локальный козел произошел на первом блоке Ленинградской АЭС в октябре 1975 г. Было частичное разрушение активной зоны. При ликвидации козла во внешнюю среду было выброшено около 1,5 млн. Ки.

В отличие от реакторов ВВЭР в уран-графитовых реакторах меньше вредное поглощение нейтронов. Поэтому в этих реакторах для ядерного топлива требуется примерно в 2 раза меньшее, чем для ВВЭР, исходное обогащение ^{235}U .

Энергоблоки Сибирской АЭС (двухцелевые) начинали работать на урановом топливе естественного обогащения и в них локальные реакторы фактически отсутствовали. В реакторах типа РБМК в начальный период обогащение ^{235}U составляло 1,8% (в активной зоне большее и вредное поглощение нейтронов и существенно большее выгорание ^{235}U). Поэтому, хотя и в не такой мере, как в ВВЭР, в топливе РБМК возможно образование локальных реакторов [101].

Неприятности с образованием критических масс могут быть и с выгруженными из реактора ТВС. Они тем больше, чем выше обогащение ^{235}U в твэлах, т.е. чем меньше критическая масса, тем больше риск ее превысить, как при хранении, так и при транспортировке ядерного топлива [64]. Хотя при транспортировке на АЭС свежего топлива с заводов — изготовителей твэлов и ТВС (без воды) с низким обогащением ^{235}U и обеспечивается ядерная безопасность, но при этом должна быть гарантия от затопления водой транспортных контейнеров. Безопасное транспортирование топлива для РБМК по сравнению с ВВЭР-1000 допускается в больших размерах, так как процент обогащения ^{235}U примерно в 2 раза ниже. Хорошо известно, что в свежем урановом топливе (обогащение 1,8%) экспериментальное значение минимальной критической массы в активной зоне РБМК составляет 23 ТВС [167]. Среди них в опыте не было допол-

нительных поглотителей, а в зазорах между ТВС и технологическим циркониевым каналом отсутствовала поглощающая нейтроны вода. Если среди ТВС поместить один канал с поглотителем нейтронов, то минимальная критическая масса ($M_{кр}$) будет состоять уже из 69 ТВС.

Таблица 52

**Экспериментальное значение критических масс (число ТВС)
различных загрузок на блоке 2 Ленинградской АЭС
для различных состояний РБМК [167, 168]**

Номер загрузки	Число		Введенные в активную зону стержни СУЗ				Наличие воды	
	ТВС	ДП	ПКАЗ	РР	АР	УСП	в каналах	в контуре СУЗ
1	24	—	—	—	—	—	Нет	Нет
2	916	154	—	56	—	—	«	«
3	1437	239	8	89	12	20	Есть	«
4	1452	239	1	85	12	20	«	Есть

*ПКАЗ – стержни перекompенсации; РР – стержни ручного регулирования; АР – стержни автоматического регулирования; УСП – укороченные стержни-поглотители.

Для специальных 4 загрузок РБМК данные о $M_{кр}$ приведены в табл. 52. Как видно из табл. 52, $M_{кр}$ была получена при отсутствии среди 24 ТВС дополнительных поглощающих нейтроны каналов (ДП) и стержней СУЗ. Выгорание ^{235}U в твэлах ТВС отсутствовало.

На всех реакторах усилиями разработчиков и в ходе эксплуатации непрерывно совершенствовались системы управления цепной ядерной реакцией, разрабатывались мероприятия, гарантирующие обеспечение как ядерной, так и радиационной безопасности.

После аварии на блоке 1 Ленинградской АЭС в отрасли решением Н.А.Семенова и А.П.Александрова на всех реакторах такого типа было введено локальное регулирование мощности, т.е. была создана система локальных автоматических регуляторов.

Кроме отраслевого контроля за обеспечением ядерной и радиационной безопасности в стране с самого начала была организована Государственная служба контроля радиационной безопасности, а затем и служба ядерной безопасности.

Как показал опыт эксплуатации, во всех случаях выход реактора из-под контроля может вызвать крупнейшую аварию и даже ядерную катастрофу. Анализ последствий крупнейших катастроф на ЧАЭС и в ряде других зарубежных стран довольно подробно дан в работе [156].

Первые государственные службы радиационной и ядерной безопасности

Еще до пуска в лаборатории № 2 первого опытного реактора Ф-1 в стране была создана Государственная служба контроля радиационной безопасности. К разработке методов и приборов контроля, норм и правил работы с радиоактивными материалами были привлечены ведущие институты Академии наук и Минздрава. На основании опыта работы с радием и на циклотронах разрабатывались допустимые нормы облучения персонала, нормы сброса радиоактивных элементов в гидросферу и в атмосферу. На первом заседании 24 апреля 1946 г. секции НТС ПГУ № 5 было одобрено предложение Я.Б.Зельдовича по организации индивидуального фотоконтроля «лучистой вредности». Я.Б.Зельдовичу и было поручено организовать этот контроль в лаборатории № 2. Одновременно с подготовкой к пуску в лаборатории № 2 опытного реактора Ф-1 специалисты Минздрава СССР и ПГУ организовывали систему радиационного контроля на первых отечественных предприятиях, работающих с источниками излучений и с природным ураном. Было также решено в системе ПГУ организовать выпуск дозиметрических приборов. По докладам А.А.Летавета и Л.А.Орбелли было признано:

- медико-санитарное обслуживание РИАНа и лаборатории № 2 проводить силами Института профзаболеваний Минздрава СССР (директор А.А. Летавет);
- в системе предприятий ПГУ организовать медсанчасти.

Несколько позднее (18 сентября 1946 г.) секция приняла решение по результатам обследования профессиональной вредности у работников комбината № 6, добывающего урановую руду в Средней Азии.

Как отмечается в работе [26], еще задолго до постройки котла в лаборатории № 2 была создана дозиметрическая группа во главе с Б.Г.Дубовским. Кроме разработки дозиметров γ -излучения, нейтронов и радиоактивного газа, группа обеспечивала связь с биологами и медиками, которые интенсивно изучали действие на человека ионизирующих излучений: «При пуске котла мы уже имели образцы разработанного дистанционного гамма-дозиметра, измеряющего наличие радиоактивного газа в воздухе. Кроме того, сотрудниками Радиационной лаборатории АМН СССР были разработаны индивидуальные интегрирующие дозиметры с применением наперстковых ионизационных камер и фотопленки. С помощью этих приборов мы контролировали радиационную безопасность и проводили биологические опыты с животными. Серьезных поражений людей, обслуживающих Первый Советский атомный котел, не было. Несколько позже были сконструированы дозиметры тепловых и быстрых нейтронов» [26].

Разработкой дозиметров занимались и в других институтах и на предприятиях. На секции № 5 было решено также: «Принять к сведению сообщение о постановке работы по конструированию дозиметров в РИАНе и ЛФТИ, включить их в сводный план по дозиметрии. Поручить А.И.Бурназяну (заместителю министра здравоохранения) контроль за выполнением плана». В протоколах № 16–17 заседания секции в декабре 1946 г. были рассмотрены и одобрены предложения сотрудников лаборатории № 2 Б.Г.Дубовского и И.С.Панасюка о новых типах дозиметров. К работам по изготовлению дозиметров были привлечены и немецкие ученые, работающие в лаборатории Б на Южном Урале (группа К.Циммера), а также на заводе № 12 в г. Электростали.

Для обслуживания работников предприятий ПГУ началась подготовка врачей радиологов. На объектах создавались службы дозиметрии. Впоследствии функции изучения воздействия радиации на организм человека, а также разработка всех видов нормативов работы с радиоактивностью были переданы Институту биофизики.

Службой радиационной безопасности страны, возглавляемой Минздравом СССР, были разработаны нормы радиационной безопасности (НРБ) и основные санитарные правила (ОСП). Эти нормативы непрерывно совершенствовались. В третьем издании НРБ-76/87 и ОСП-72/87 указано, что они распространяются на все предприятия и учреждения всех министерств и ведомств, где возможны производство, обработка, применение, хранение, переработка, обезвреживание и транспортирование естественных и искусственных радиоактивных веществ и других источников ионизирующих излучений [81]. В этих нормативах также отмечается, что никакие ведомственные и отраслевые правила и инструкции не должны им противоречить. Виновные за нарушение норм привлекаются к административной, а при грубых нарушениях к уголовной ответственности.

До 1972 г. в стране не было официально утвержденной, государственной службы, ответственной за ядерную безопасность. Однако с 1958 г. в ФЭИ была создана отраслевая научно-исследовательская лаборатория Минсредмаша, оснащенная необходимыми стендами для проведения опытов по определению условий обеспечения ядерной безопасности в атомной промышленности. Возглавил лабораторию один из сотрудников И.В.Курчатова, участник пуска реактора Ф-1, бывший научный руководитель промышленного реактора А Б.Г.Дубовский. В руководимой им лаборатории кроме экспериментальных данных по определению критических масс разрабатывались основные нормативные документы по обеспечению ядерной безопасности на предприятиях отрасли. На всех предприятиях были введены должности ответственных лиц (заместитель главного инженера или главные физики), которые контролировали соблюдение указанных нормативов. Фактическим науч-



**АВЕТИК
ИГНАТЬЕВИЧ
БУРНАЗЯН
(1906—1981) —**

*генерал-лейтенант
медицинской службы,
первый руководитель
Государственной
службы контроля
радиационной
безопасности*

ным руководителем этих проблем в отрасли и созданной службы и был тогда Б.Г.Дубовский.

С развитием ядерной энергетики, вводом в эксплуатацию исследовательских реакторов, строительством ледокольного атомного флота проблемы ядерной безопасности появились в различных отраслях и ведомствах. После серии аварий, связанных с возникновением самопроизвольных цепных ядерных реакций на промышленных предприятиях и в институтах, в 1972 г. при основном производителе делящихся материалов — Минсредмаше была создана специальная инспекция — первый Госатомнадзор, на который была возложена ответственность по контролю за обеспечением ядерной безопасности. Первым руководителем Госатомнадзора был назначен Н.И.Козлов — один из ведущих специалистов в области эксплуатации ядерных реакторов¹.

На указанную инспекцию, хотя и возлагались общегосударственные функции по контролю за обеспечением ядерной безопасности, но из-за подчиненности руководству Минсредмаша ее деятельность не могла быть полностью независимой. Принципиальные решения Н.И.Козлова по отдельным нарушениям ядерной безопасности и мерам по их устранению, касающиеся институтов, конструкторско-проектных организаций и предприятий Минсредмаша, могли быть не одобрены министром или его первым заместителем. Поэтому впоследствии было решено этот орган сделать независимым. Было признано, что он, кроме ядерной безопасности, должен

¹ Н.И.Козлов начал работу в 1948 г. на Первом промышленном ядерном реакторе. Затем работал руководителем уран-графитового реактора АВ-2 и заместителем главного инженера комбината № 817 в Челябинске-40.

контролировать и отдельные проблемы технической безопасности, связанные с работой основного оборудования ядерных реакторов АЭС.

Для обеспечения государственного контроля за обеспечением ядерной и технической безопасности постановлением Совета Министров СССР от 14 июля 1983 г. № 653-27 был образован Госатомэнергонадзор СССР*. Его главными задачами являлись [169]:

- **надзор** за соблюдением всеми министерствами, ведомствами, предприятиями, организациями, учреждениями и должностными лицами установленных правил, норм и инструкций по ядерной и технической безопасности при проектировании, сооружении и эксплуатации объектов ядерной энергетики;
- **надзор** за конструированием и изготовлением оборудования для этих объектов, а также за хранением и транспортировкой ядерного топлива и радиоактивных отходов на указанных объектах;
- **надзор** за ведением работ на опытных и исследовательских ядерных реакторах по вопросам ядерной безопасности в НИИ, КБ и на энергетических установках ВМФ и гражданского флота;
- **контроль** за разработкой министерствами и ведомствами нормативной документации по обеспечению безопасной эксплуатации объектов ядерной энергетики;
- **осуществление контроля** за учетом ядерных делящихся материалов на объектах ядерной энергетики;

* Руководителем Госатомэнергонадзора (независимым от Минсредмаша) был назначен Е.В. Кулов, а первым заместителем — В.А. Сидоренко.



ГЛЕБ
МИХАЙЛОВИЧ
ФРАНК

(1904—1976) —

академик с 1966 г.,
первый руководитель
Радиационной
лаборатории
АМН СССР,
а затем
Института биофизики



**БОРИС
ГРИГОРЬЕВИЧ
ДУБОВСКИЙ —**
научный руководитель
по ядерной
безопасности
на предприятиях
топливного цикла
(с 1968 по 1983 г.)

- **контроль** за проведением мероприятий по предупреждению аварий на объектах ядерной энергетики и готовностью предприятий к их ликвидации;
- **осуществление в установленном порядке контроля** за качеством строительства объектов ядерной энергетики и монтажа оборудования на этих объектах.

Среди других задач, решаемых Госатомэнергонадзором, были координация и контроль проводимых разными ведомствами научных исследований, направленных на обоснование требований по безопасности объектов ядерной энергетики и эффективности технических решений, применяемых для обеспечения безопасности этих объектов. В Положении [169] было отражено, что научное руководство исследованиями по безопасности объектов ядерной энергетики осуществляет Институт атомной энергии им. И.В. Курчатова. Проблемы радиационной безопасности оставались за Минздравом СССР, а учет и хранение делящихся материалов, используемых в ядерном оружии, — за Министерством обороны.

С образованием СНГ в каждом государстве созданы свои органы надзора. В России, например, функции надзора возложены на Госатомнадзор. Однако до сих пор уточняется ответственность за ряд функций государственного надзора между ведомствами по проблемам технической и радиационной безопасности на предприятиях, подведомственных Минатому России, и за радиационной безопасностью и хранением радиоактивных материалов на различных объектах и базах в Министерстве обороны. Ликвидация ядерных боеприпасов и сокращения ядерных вооружений делают эти проблемы еще более актуальными, как на предприятиях России, так и в других странах СНГ, имеющих изделия из обогащенного ^{235}U и плутония.

Как отмечалось на заседании Коллегии Минатома России (5 октября 1993 г.), рассмотревшей состояние ядерной и радиационной безопасности на предприятиях отрасли, в эксплуатации находятся следующие ядерные и радиационно-опасные объекты:

- **29 энергоблоков** на 9 АЭС общей установленной мощностью 21,2 тыс. МВт;
- **15 исследовательских реакторов и 30 критических стенов** в НИИ и КБ отрасли;
- **3 промышленных уран-графитовых реактора** типа АДЭ, реакторы «Руслан» и «Людмила»;
- **заводы** по изготовлению и переработке ядерного топлива (2 завода по изготовлению твэлов и ТВС, 4 завода по разделению изотопов, 2 химико-металлургических завода, 3 радиохимических завода);
- **ядерно-опасные участки и лаборатории** научно-исследовательских институтов;
- **хранилища и места складирования** свежего и отработавшего топлива и делящихся материалов на АЭС, промышленных и исследовательских реакторах, заводах топливного цикла, в НИИ и КБ отрасли.

Радиационная обстановка на предприятиях отрасли в 1993 г. характеризовалась следующими данными: при допустимой дозе облучения 5 бэр/год средняя доза внешнего облучения персонала составила 0,47 бэр. Зарегистрировано переоблучение до 7,5 бэр у 25 работников Смоленской АЭС при проведении ремонтных работ, которое было разрешено органами Госсаннадзора; незначительное превышение установленного нормативного годового поступления радионуклидов в организм



**НИКОЛАЙ
ИВАНОВИЧ
КОЗЛОВ** —
первый руководитель
службы ядерной
безопасности
(с 1972 по 1983 г.)

отмечено у 49 горнорабочих Приаргунского горно-химического комбината.

В связи с возможным переходом на новые, более низкие дозовые пределы для персонала и населения, рекомендуемые Международным агентством по атомной энергии и Международной комиссией радиологической защиты (2 бэр/год — для персонала и 0,1 бэр/год — для населения), на предприятиях отрасли намечено провести большой комплекс научно-технических и организационных подготовительных работ по их практическому внедрению.

Коллегия отметила, что двухцелевые уран-графитовые реакторы АДЭ-2 (ГКХ — Красноярск-26), АДЭ-4 и -5 (Сибирский химический комбинат — г. Томск) работают устойчиво и обеспечивают теплом и электроэнергией закрытые города, а областной центр — г. Томск на 75% получает тепло с Сибирской АЭС.

В решении Коллегии в соответствии с распоряжением правительства России даны поручения подготовить федеральную целевую программу «Безопасность атомной энергетики и промышленности Российской Федерации». Даны и другие поручения по обеспечению ядерной и радиационной безопасности, включая разработку отраслевой концепции по реагированию на чрезвычайные ситуации.

Кроме ведомственных задач, решаемых Минатомом России, большая роль в обеспечении ядерной радиационной безопасности в стране принадлежит и общегосударственным органам. Уточнение функций этих ведомств, как и утверждение Закона по атомной энергии, должны быть решены в кратчайшее время.



ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Использование внутриядерной энергии в первую очередь обязано открытию радиоактивности, столетие которого будет отмечаться мировой научной общественностью в 1996 г. В нашей стране в довоенный период работами В.И. Вернадского, В.Г. Хлопина, Л.С. Коловрат-Червинского, Г.А. Гамова, Л.В. Мысовского, А.Ф. Иоффе, И.В. Курчатова и других ученых были заложены основы изучения радиоактивности и физики деления ядра. Организация производства радия и использование его с продуктами распада в медицине, ядерно-физических и радиохимических исследованиях, создание и пуск в РИАНе первого в стране и в Европе циклотрона, а также открытие деления ядер урана позволили академику В.И. Вернадскому организовать в 1940 г. при АН СССР Урановую комиссию. Эта комиссия в 1940–1941 гг. предложила первый проект общегосударственной программы по использованию энергии деления ядер урана. В программе были предусмотрены работы по изучению запасов урана и организации его добычи, намечены головные институты — разработчики методов разделения изотопов урана, включены предложения по укреплению ряда институтов новыми экспериментальными установками для проведения исследовательских работ по использованию в народном хозяйстве внутриядерных превращений. Страна была подготовлена к проведению указанных работ. В предвоенный период молодыми учеными Г.Н. Флёровым и К.А. Петржаком было открыто спонтанное (без облучения нейтронами) деление ядер урана. Ранее изданные монографии ленинградских физиков — теоретика Г.А. Гамова и экспериментатора И.В. Курчатова указывали на возможности отечественных ученых самостоятельно вести основополагающие работы по использованию внутриядерной энергии. В 1939–1940 гг. Я.Б. Зельдовичем и Ю.Б. Харитоном были проведены специальные расчеты, указывающие на возможности получения цепной

ядерной реакции при использовании слабообогащенного ^{235}U в смеси с тяжелым водородом или графитом. Ими же были выяснены условия возникновения ядерного взрыва и сделаны оценки его разрушительной мощности. Данные по накоплению больших запасов урана в Германии и США, публикации о результатах проводимых за рубежом (Э. Ферми и Ф.Ж.-Кюри) и в нашей стране (Г.Н. Флёровым и Л.И. Русиновым) работ по определению числа вторичных нейтронов, возникающих на один исходный нейтрон, захваченный ядром урана, подтверждали реальность осуществления цепной ядерной реакции. После начала войны публикации зарубежных ученых в открытой печати были прекращены, а в нашей стране, когда многие ученые были призваны в армию, ведущие институты Ленинграда и Москвы эвакуированы в восточные регионы, исследования по изучению возможности использования энергии деления ядер практически не проводились. Работы в СССР были возобновлены на основании данных разведки, указывающих, что в Германии, Великобритании и США интенсивно ведутся исследования по использованию ядерной энергии в военных целях. Работа разведки, информирующей наше правительство о секретных исследованиях за рубежом, была хорошо организована. Как отмечалось выше, уже к середине 1943 г. научный руководитель Уранового проекта И.В. Курчатов докладывал М.Г. Первухину о степени ценности 237 поступивших к нам материалов по различным направлениям атомной науки, включая работы по получению ^{239}Pu и обогащенного ^{235}U . Дополнительную оценку важности материалов разведки приводит академик Ю.Б. Харитон: «Разведка позволила нашим физикам максимально сократить время, помогла избежать «осечки» при проведении первого атомного взрыва, имевшего огромное политическое значение. Разведка сделала И.В. Курчатова самым информированным физиком-ядерщиком, который, зная достижения своих коллег, одновременно на важном начальном этапе ядерной гонки был посвящен в результаты западных специалистов» [170]. Следует напомнить, что И.В. Курчатов имел право с материалами разведки, с разрешения М.Г. Первухина, знакомить своих ближайших заместителей, отвечающих за отдельные направления Уранового проекта. Материалы разведки были ценны не только для физиков-ядерщиков. Они были особенно ценны для ученых и конструкторов, разработчиков технологий и оборудования для разделения изотопов урана различными методами, проблем, связанных с созданием уран-графитовых и тяжеловодных реакторов на природном уране, получения металлического урана, гексафторида урана, тяжелой воды и т.д. Как уже отмечалось, были материалы и по конструкции атомной бомбы и ряду других проблем. Естественно, что к оценке важности получаемых разрозненных или обобщенных материалов И.В. Курчатов привлекал не только физиков-ядерщиков,

но и металлургов, металлосоведов, работающих с металлическим плуто-нием и ураном, физикохимиков и других специалистов — руко-водителей отдельных научных направлений. Поэтому не только И.В. Курчатов, но и И.К. Кикоин, Ю.Б. Харитон, А.А. Бочвар, Л.А. Арцимович и другие научные руководители соответствующих проблем тоже становились самыми информированными [102,171]. Однако в США отмечалось, что не научные проблемы будут главными в реализации Уранового проекта. Опубликовав в 1945 г. книгу Г. Смита «Атомная энергия для военных целей» (официальный отчет о разработке атомной бомбы под наблюдением правительства США), руководство США показало свою уверенность в том, что из-за техниче-ских трудностей, неготовности нашей промышленности организовать производство и построить заводы для получения плутония и высоко-обогащенного ^{235}U создать атомную бомбу в СССР можно лишь при-мерно через 10 лет: «Основные трудности, которые должны были преодолеть Советы для создания бомбы, были связаны с тяжелой промышленностью и производством. У Советского Союза были свои прекрасные ученые, которые могли найти ответы на все вопросы самостоятельно». А им еще, бесспорно, помогли и данные разведки.

Мобилизация материальных и людских ресурсов страны, привле-чение многих отраслей промышленности к работам над Урановым проектом опровергли заключения США о возможностях советской промышленности. Достигнуто все это было признанием Уранового проекта программой № 1 и ответственностью за ее реализацию не только ученых во главе с И.В. Курчатовым, но и в не меньшей мере административно-технического руководства страны. Достаточно сказать, что четыре заместителя Председателя Совнаркома СССР (Л.П. Берия, М.Г. Первухин, В.А. Малышев и Н.А. Вознесенский) с 1945 г. несли персональную ответственность перед И.В. Сталиным за своевременное выделение ресурсов ряду отраслей промышлен-ности, чтобы обеспечить в первую очередь институты, КБ и пред-приятия ПГУ — нарождающуюся атомную промышленность всем необходимым.

Хотя отечественные ученые и инженеры, решая отдельные пробле-мы создания ядерного оружия, и использовали разведывательные данные, но основные технологические и технические проблемы ре-шали самостоятельно. Для подтверждения достоверности этих дан-ных и определения многих отсутствующих, а также разработки новых технологических процессов и систем контроля, необходимых как для получения делящихся материалов, так и при создании конструкции самой бомбы, были привлечены к выполнению работ по программе № 1 многие институты АН СССР.

30 августа 1995 г. исполнится 50 лет со дня организации ПГУ для решения задач по разработке ядерного оружия и созданию атомной

промышленности. В первую очередь к создателям ядерного щита нашей Родины следует отнести тех, кто обеспечил ввод в эксплуатацию предприятий, на которых были получены делящиеся материалы. Этих предприятий немного, но для их строительства и ввода в эксплуатацию были привлечены большие коллективы различных НИИ, КБ, проектных, строительных и монтажных организаций различных ведомств страны. В строительстве каждого комбината участвовали десятки тысяч специалистов и рабочих различных профессий. Координирующая роль Специального комитета, аппарата ПГУ при Совете Министров СССР и научного руководителя урановой проблемы И.В. Курчатова в первые послевоенные годы была исключительной.

Среди первых награжденных в 1949 г. создателей плутониевой бомбы были не только руководитель лаборатории № 2 и разработчики КБ-11, но и главный инженер комбината № 817, научные руководители ряда проблем, руководители из Специального комитета и ПГУ. Звание Героя Социалистического Труда было присвоено:

- **М.Г. Первухину** – заместителю председателя Совета Министров СССР;
- **И.В. Курчатову** – научному руководителю проблемы и комбината № 817;
- **Е.П. Славскому** – главному инженеру комбината № 817;
- В.Г. Хлопину** – директору РИАНа;
- А.А. Бочвару** – начальнику отдела НИИ-9, научному руководителю завода В комбината № 817;
- А.П. Завенягину** – первому заместителю начальника ПГУ;
- Ю.Б. Харитону** – научному руководителю КБ-11;
- К.И. Щелкину** – заместителю научного руководителя КБ-11;
- А.Н. Комаровскому** – заместителю начальника ПГУ, начальнику Главпромстроя НКВД;
- П.К. Георгиевскому** – заместителю начальника Главпромстроя.

Высокое звание дважды Героя Социалистического Труда было присвоено Б.Л. Ванникову, Б.Г. Музрукову. Постановлением от 29 октября 1949 г. звание Героя Социалистического Труда было присвоено также и другим руководителям промышленности и ученым, внесшим основной вклад в получение делящихся материалов и создание плутониевой бомбы. Среди них: В.И. Алферов, Г.Н. Флёров, Н.Л. Духов, А.П. Виноградов, Я.Б. Зельдович, А.Н. Каллистов, Н.А. Доллежалъ, Б.Н. Чирков, Ю.Н. Голованов, работавший на заводе № 12 немецкий ученый Н. Риль и некоторые другие. Впоследствии правительством были награждены большие коллективы многих предприятий, НИИ и КБ, активно участвовавших в разра-

ботке и изготовлении различных изделий и материалов, оборудования и приборов, необходимых как для создания ядерного оружия, так и для других направлений использования в народном хозяйстве достижений атомной науки и техники. Большой группе участников работ по программе № 1 от различных НИИ, КБ и предприятий, обеспечивших создание первой атомной (плутониевой) бомбы, были присуждены звания лауреатов Сталинской премии*. Из 176 награжденных этими премиями:

- 39 чел. лауреаты I степени;
- 112 чел. лауреаты II степени;
- 25 чел. лауреаты III степени.

В 1951 г. постановлением от 6 декабря № 4964-2148 за организацию производства получения ^{235}U (90%-го обогащения) и разработку из него ядерного оружия звание Героев Социалистического Труда было присвоено:

И.К. Киконину — научному руководителю комбината № 813 и диффузионного метода обогащения урана;

С.Л. Соболеву — заместителю научного руководителя проблемы;

А.И. Чурину — директору комбината № 813.

И.В. Курчатову, Ю.Б. Харитону и К.И. Щелкину были вручены вторые Золотые медали «Серп и Молот». Всем им, а также главному инженеру комбината № 813 М.П. Радионову были присвоены и Сталинские премии I степени.

Всего Сталинскими премиями трех степеней указанным постановлением было награждено из 55 коллективов 390 чел.

Многие сотрудники комбината № 813, лаборатории № 2 АН СССР, а также соисполнители из различных ведомств были награждены орденами и медалями.

Международная обстановка потребовала огромных усилий народного хозяйства страны по интенсивному развитию атомной промышленности. В 1949–1953 гг. непрерывно совершенствовалась структура управления развивающейся атомной промышленностью. Б.Л. Ванин-ков переводится в Специальный комитет заместителем Л.П. Берии, а А.П. Завенягин назначается руководителем ПГУ. С комбината № 817 на должность заместителя начальника ПГУ возвращается Е.П. Славский. При Совете Министров СССР создаются Второе (начальник П.Я. Антропов) и Третье (начальник В.С. Рябиков) главные управления. В Главпромстрое МВД СССР вместо А.Н. Комаровского руководителем назначается (с конца 1951 г.) Ф.А. Гвоздевский. В ПГУ постановлением, подписанным И.В. Сталиным

* С 1939 по 1955 г. премии назывались Сталинскими, а затем Государственными; с 1957 г. стали присуждаться Ленинские премии.

6 декабря 1951 г., заместителем руководителя по строительству был назначен А.В. Коротков, ранее работавший в Министерстве авиационной промышленности. 26 июня 1953 г. было создано Министерство среднего машиностроения, объединившее Первое, Второе и Третье главные управления при Совете Министров СССР. Для его размещения на Большой Ордынке было построено прекрасное здание, где и в настоящее время находится аппарат Минатома России.

Первым министром среднего машиностроения был назначен известный государственный деятель инженер-машиностроитель В.А. Малышев, одновременно являвшийся заместителем Председателя Совета Министров СССР. С конца 1945 г. он стоял у истоков организации разработок, а затем в основном и обеспечил всю кооперацию машиностроительных предприятий страны по выпуску оборудования для



*Здание
Министерства
среднего
машиностроения –
Минатома
России*

диффузионных заводов серийного производства обогащенного ^{235}U . Первыми заместителями министра среднего машиностроения в 1953 г. были назначены Б.Л. Ванников и М.В. Хруничев. В.А. Малышеву принадлежит и одна из ведущих ролей в организации первых работ (вместе с И.В. Курчатовым, А.П. Александровым, А.И. Лейпунским и другими учеными и специалистами) по использованию ядерных установок на ледоколах и на кораблях ВМФ.

Минсредмаш в 1953 г. взял на себя многие функции бывшего Специального комитета. Постановлением Совета Министров от 9 июля 1953 г. основные подразделения Главпромстроя МВД СССР были также переданы в систему Минсредмаша. В Главпромстрой входили Главное управление капитального строительства, 1, 2 и 3 строительные управления, Главмонтаж и Управление производственных предприятий, преобразованные затем соответственно в 9, 10, 11, 12 главные управления и 13 Управление. В строительно-монтажных управлениях работало много военных строителей, которые из воинских частей Министерства обороны и МВД формировались в строительные батальоны и полки для работы на строительстве предприятий и институтов развивающейся, особо режимной отрасли. Однако не только военные строители, но и большое количество вольнонаемных и спецконтингент (заключенные) обеспечивали ввод многочисленных промышленных предприятий, строительство закрытых городов и поселков, предприятий соцкультбыта. С их участием создавали мощную экспериментальную базу многочисленных НИИ и КБ.

Основное развитие отрасль получила в период, когда Минсредмаш почти 30 лет (с 1957 г.) возглавлял Е.П. Славский. За эти годы в отрасли были созданы новые НИИ и КБ, укреплены материальная база и коллективы собственных строительно-монтажных предприятий, построены многочисленные заводы и промышленные объекты, обеспечивающие успешное развитие оборонных и гражданских программ.

Особенно крупными были предприятия по производству золота, циркония и минеральных удобрений. Создание в отрасли заводов по производству других важнейших материалов, особенно серной кислоты и различных химических реагентов, а также строительных материалов, позволило предприятиям министерства выпускать основную продукцию с минимальным привлечением других отраслей народного хозяйства. Как отмечает руководитель Минатом России В.Н. Михайлов [172]: «Минатом добывает самое чистое в мире золото. У нас самое дешевое производство циркония, самая эффективная технология разделения изотопов с энергопотреблением в 20 раз ниже, чем в США. ...За счет переработки бедных руд мы выпускаем чистые оксиды молибдена, вольфрама, ванадия. В Минатоме работают несколько заводов по производству серной, азотной и плавиковой кислот, элементарного фтора. Наши предприятия произ-

водят тантал и ниобий, цирконий и гафний, литий и бериллий, щелочно-земельные металлы и изделия из них». Однако главным в отрасли все прошедшие годы был оборонный заказ, связанный с созданием ядерного и термоядерного оружия. В настоящее время стоит огромной важности задача по разборке и уничтожению значительной части этого арсенала оружия. Сложности ее решения, имеющих опыт Минатома России и других ведомств, требуемые финансовые затраты приведены в известной публикации [172]. При этом указывается, что: «Ядерное оружие – это сложное устройство, которое включает в себя и электронику, и генераторы, и ядерно-активные материалы – уран, плутоний, тритий, и обычные взрывчатые вещества. Оно имеет и ограниченный срок службы – например 10–15 лет, а затем поступает на разборку. Поэтому работы по разборке мы вели всегда. ...В области тактического ядерного оружия объем работ по утилизации ядерных зарядов и их уничтожению увеличится. Правда, и сейчас наши заводы больше заняты ликвидацией старых зарядов, чем производством новых».

Не только успехи сопровождали работу развивающейся атомной промышленности. Кроме известных сейчас всему миру ядерных катастроф и аварий были, особенно на первых комбинатах и заводах, многочисленные нарушения, как из-за несовершенных технологических процессов, созданных учеными и конструкторами, так и по вине эксплуатационного персонала. Так, на комбинате № 817 на двух сданных в конце 1951 г. в эксплуатацию ядерных реакторах (ОК-180 и АИ) через несколько лет произошли такие нарушения и аварии, которые привели к их досрочной остановке и демонтажу. На реакторе АИ уже в 1958 г. был проведен вынужденный капитальный ремонт с частичной заменой графитовой кладки. Реактор ОК-180 после аварии в системе разгрузки урановых блоков был остановлен на ремонт, а затем после нескольких лет работы в 1965 г. был демонтирован. Всего лишь 10 лет работал на этом комбинате и реактор ОК-190. На комбинатах № 817, 816, заводе № 12, в ФЭИ и ИАЭ им. И.В. Курчатова произошли аварии, связанные с неконтролируемыми процессами при работе специальных критических сборок и опытных стендов, которые приводили к возникновению «локальных» реакторов и самопроизвольных цепных ядерных реакций. Были аварии и на других заводах и в институтах.

Не стоит в заключении перечислять причины этих аварий и их последствия, а также вспоминать многие другие аварийные отклонения от нормальной работы как на промышленных предприятиях и стройках, так и в научных и конструкторских организациях. В условиях гонки вооружений были и успехи, были и аварийные ситуации с тяжелыми последствиями.

При большинстве вновь созданных предприятий были построены прекрасные города и поселки. В 1977 г. ведущим проектировщикам

и строителям, принимавшим участие в строительстве городов Шевченко и Навои, за высокие архитектурные достижения были присуждены Государственные премии. Среди дважды лауреатов следует отметить заслуженного строителя РСФСР А.В. Короткова, длительное время возглавлявшего в министерстве 9 ГУ, в ведении которого были проектные институты. Среди других городов, которыми заслуженно гордятся не только их жители, надо назвать Озерск, Кремлёв, Зарафшан, Димитровград, Дубну, Обнинск, Сосновый Бор, Академгородок в Новосибирске и др. За оригинальные решения архитектурно-строительных проблем в стране двум сотрудникам ГСПИ-11 была вручена международная премия. За создание г. Навои была присуждена Всемирная премия им. Патриса Абер Кромби, которую в Мадриде вручал генералиссимус Франко. Это был первый выезд наших специалистов в Испанию.

Развитие предприятий атомной промышленности требовало серьезного научно-медицинского обеспечения. Совместными усилиями Минсредмаша, ЦК профсоюза отрасли и Минздрава СССР практически при каждом медсанотделе предприятий ядерного топливного цикла были построены и укомплектованы медицинским персоналом и оборудованием поликлиники и больницы для обслуживания сотрудников и членов их семей. И это при том, что к настоящему времени более 100 промышленных комплексов ядерного топливного цикла, включая 9 АЭС, 8 комбинатов по производству ядерных материалов, объекты по производству ядерного оружия, расположены на 24 административных территориях России. Усилиями Е.П. Славского, А.И. Бурназяна и А.Н. Каллистова почти во всех курортных районах страны в период 1950–1980 гг. были построены санатории и дома отдыха.

В настоящее время общая численность пользующихся услугами медицинских учреждений в Минатоме России составляет 2,2 млн. чел., в том числе 0,5 млн. детей. Коллегия Минатома России и руководство Минздрава ищут пути, как сохранить созданную многолетними усилиями комплексную систему специализированной медико-санитарной помощи работникам атомной промышленности.

Наличие собственной фундаментальной науки с хорошей экспериментальной базой, особенно по решению проблем ядерной физики и физики твердого тела, позволило ученым и специалистам Минсредмаша в 1970–1980 гг. проводить уникальные исследования на мировом уровне, что подтверждалось ежегодным получением примерно 15% всех открытий, создаваемых в нашей стране.

Аппарат Минсредмаша направлял всю многогранную работу отрасли. На нижеприведенной фотографии помещены далеко не все руководители основных подразделений Минсредмаша, которые помогали министру и его заместителям обеспечивать успешную работу в тот период.



Руководящий состав Минсредмаша в 1970–1980 гг.: сидят слева направо: Л.А. Петухов (6 ГУ), А.Д. Захаренков (заместитель министра), К.Н. Мещеряков (18 ГУ), Р.С. Зурабов (11 ГУ), А.А. Задикия (ученый секретарь ИТС), Е.П. Славский (министр), Н.Б. Карпов (1 ГУ), А.С. Пономарев (12 ГУ), П.Я. Антропов (заместитель министра), А.В. Коротков (9 ГУ); стоят слева направо: В.З. Алексеев (главный бухгалтер), Н.С. Баскаков (Главснаб), П.Т. Будаев (УРС), И.П. Увин (ФУ), В.Ф. Гильберт (УОТиЗ), И.А. Кудрявцев (13 У), А.К. Круглов (ИТУ), К.В. Ильченко (Управление транспорта), А.А. Чернов (Управление делами), А.В. Портнов (ХОЗУ), Ю.С. Семендяев (Управление кадрами), С.П. Столяров (ПУ), Н.Н. Волгин (10 ГУ), В.А. Князев (ОТБ), А.Г. Александров (Управление оборудования), Г.А. Цыркoв (5 ГУ), П.К. Георгиевский (заместитель министра), Л.Г. Мезенцев (заместитель министра)

Под руководством И.В. Курчатова, а позднее Е.П. Славского и А.И. Чурина в отрасли ежегодно проводились конференции по обмену опытом в решении основных научно-технических проблем отрасли. К участию в них привлекались не только ведущие ученые ПГУ и Минсредмаша, но и руководители других отраслей, академий наук, Госкомитета по науке и технике, областей и республик.

Координирующие и контрольные функции по развитию отрасли выполнял не только аппарат Министерства. Созданная в конце 70-х гг. система головных институтов по отдельным направлениям развития атомной науки и техники тоже способствовала сокращению параллелизма, особенно в разработке конкретных технологий и конструкций. Однако диктат головных институтов иногда рождал монополизм со всеми его отрицательными последствиями.

В заключение автор выражает благодарность ветеранам отрасли А.Г. Мешкову, А.М. Петросьянцу, Н.И. Козлову, Н.Б. Карпову, В.В. Гончарову, М.Г. Мещерякову, Л.И. Надпорожскому, Ф.Я. Овчинникову, Б.В. Броховичу, Н.И. Чеснокову, В.И. Меркину,



**Конференцию по восстановлению специальной техники проводит
Е.П. Славский (г. Навои, 1983 г.)**

Ю.Д. Корсакову, И.П. Увину, П.М. Верховых, Я.П. Докучасву, К.Г. Ткачу, Н.П. Удянскому, В.В. Титовой, Л.П. Сохиной, В.Н. Нефедову, Л.А. Алехину, В.И. Шаралапову, В.Г. Кириллову за консультации при обсуждении отдельных исторических событий и предоставление материалов. Написанию этих воспоминаний во многом способствовало создание в ЦНИИАтоминформе руководителями редколлегии Бюллетеня Центра общественной информации по атомной энергии В.Г. Терентьевым, А.Н. Нерсисяном, Л.Б. Прображенской и В.Ф. Галичем рубрики «Страницы истории» по атомной науке и технике. До настоящего времени в отрасли нет Центрального музея, демонстрирующего развитие атомной науки и техники. Хотелось надеяться, что труд первопроходцев и история первых атомных предприятий не канут в Лету и в России будет создан такой музей.



1. **Старосельская-Никитина О.А.** История радиоактивности и возникновение ядерной физики. М.: Изд-во АН СССР, 1963.
2. **Содди Ф.** История атомной энергии. М.: Атомиздат, 1979.
3. Радиевый институт им. В.Г. Хлопина: К 50-летию со дня основания. Л.: Наука, 1972.
4. **Игонин В.В.** Атом в СССР. Саратов: Изд-во Саратовского ун-та, 1975.
5. **Храмов Ю.А.** Физики: Биографический справочник/Под ред. А.И. Ахиезера. М.: Наука, 1983.
6. В августе 1949//Родина. 1992, № 8, 9.
7. **Первухин М.Г.** Как была решена атомная проблема в нашей стране//Там же.
8. **Славский Е.П.** Последнее интервью (публикацию подготовили А. Артизов, Р. Усиков)//Там же, № 9.
9. **Александров А.П.** Ядерная физика и развитие атомной техники в СССР//Октябрь и научный прогресс. М.: АН СССР, 1967.
10. 50 лет Харьковскому физико-техническому институту АН УССР. Киев: Наукова думка, 1978.
11. Воспоминания об Игоре Васильевиче Курчатове. М.: Наука, 1988.
12. 50 лет современной ядерной физике: Сб. статей. М.: Энергоатомиздат, 1982.
13. **Курчатов И.В.** Расщепление атомного ядра. М.—Л: Редакция общетехнических дисциплин, 1935.
14. **Головин И.Н.** И.В. Курчатов. Изд. 2-е. М.: Атомиздат, 1972.
15. К 80-летию со дня рождения Ю.Б. Харитона//Вопросы экспериментальной и теоретической физики: Сб. науч. тр. Л.: Наука, 1984.
16. **Яншин А.Л.** Изучение и освоение минерально-сырьевых ресурсов в первые годы советской власти//Великий Октябрь — 70 лет. Научно-технический и социальный прогресс. М.: Наука, 1987.
17. **Комлев Л.В., Синицина Г.С., Ковальская М.П.** Урановая проблема//Академик В.Г. Хлопин: Очерки, воспоминания современников. Л.: Наука, 1987.
18. **Курчатов И.В.** Деление тяжелых ядер//Изв. АН СССР. Сер. физ. 1941. № 4,5.
19. **Иойрыш А.И., Морохов И.Д.** Хиросима. М.: Атомиздат, 1979.
20. **Овчинников В.** Горячий пепел. Хроника тайной гонки за обладание атомным оружием. М.: АПП, 1984.
21. **Флёров Г.Н.** У истоков освоения ядерной энергии//Московские новости. 1985. № 16.
22. Сто сорок бесед с Молотовым: Из дневника Ф. Чусва. М.: Терра—Терра, 1991.
23. **Сиборг Г.** Искусственные трансурановые элементы. М.: Атомиздат, 1965.
24. **Гончаров В.В.** Первые (основные) этапы решения атомной проблемы в СССР. М.: ИАЭ им. И.В. Курчатова, 1990.
25. **Гринберг А.П., Френкель В.Я.** Игорь Васильевич Курчатов в Физико-техническом институте. Л.: Наука, 1984.
26. **Курчатов И.В., Панасюк И.С.** Строительство и пуск первого в Советском Союзе уран-графитового котла с саморазвивающейся цепной реакцией (январь—декабрь 1946 г.): Отчет № 3498-Ц. 1947.

27. **Жежерун И.Ф.** Строительство и пуск первого в Советском Союзе атомного реактора. М.: Атомиздат, 1978.
28. **Синёв Н.М.** Обогащенный уран для ядерного оружия и энергетики. М.: ЦНИИАтоминформ, 1991.
29. **Харитон Ю.Б.** Ядерное оружие СССР: пришло из Америки или создано самостоятельно? // Известия. 1992. 8 дек.
30. **Наука—техника—управление:** Сб. тр. Всеамериканской конф. по проблемам управления комплексными программами в эпоху научно-технического прогресса / Пер. с англ. М.: Сов. радио, 1966.
31. **Сахаров А.Д.** Воспоминания // Знамя. 1990. № 10–12.
32. Вторая мировая война в воспоминаниях Уинстона Черчилля, Шарля де Голля, Корделла Хэлла, Уильяма Леги, Дуайта Эйзенхауэра. М.: Издательство политической литературы, 1990.
33. **Елфимов Ю.Н.** Маршал индустрии: Биографический очерк о А.П. Завенягине. Челябинск: Южно-Уральское изд-во, 1991.
34. **Губарев В.С.** Арзамас-16. М.: ИздАт, 1992.
35. **Комаровский А.Н.** Записки строителя. М.: Воениздат, 1973.
36. **Смит Г.Д.** Атомная энергия для военных целей: Официальный отчет о разработке атомной бомбы под наблюдением правительства США. М.: Трансжелдориздат, 1946.
37. **Фурсов В.С.** Работы Академии наук по уран-графитовым реакторам: Докл. на сессии АН СССР по мирному использованию атомной энергии, 1–5 июля 1955 г. М.: Изд-во АН СССР, 1955.
38. Страницы истории ВНИИНМ: Воспоминания сотрудников. М.: ЦНИИАтоминформ, 1993. Т.1.
39. **Доллежалъ Н.А.** У истоков рукотворного мира // Трибуна академика. М.: Знание, 1989.
40. **Славский Е.П.** Когда страна стояла на плечах ядерных титанов: Литературная запись Р.В. Кузнецовой, директора Дома-музея И.В. Курчатова // Военно-исторический журнал. 1993. № 9.
41. **Брохович Б.В.** И.В. Курчатов на Южном Урале — в Челябинске-40: Воспоминания ветеранов. Челябинск-40: ПО «Маяк», 1993.
42. **Шевченко В.И.** О себе и первом реакторном заводе (1947–1957 гг.): Рукопись (г. Озерск, 1992 г.).
43. **Гладышев М.В.** Плутоний для атомной бомбы: Директор Плутониевого завода делится воспоминаниями. Челябинск-40: ПО «Маяк», 1992.
44. Материалы юбилейной сессии Ученого совета РНЦ «Курчатовский институт». М.: РНЦ «Курчатовский институт», 1993.
45. **Галапин А.Д.** Теория ядерных реакторов на тепловых нейтронах. М.: Изд-во Главного управления по использованию атомной энергии при Совете Министров СССР, 1959.
46. **Никипелов Б.В., Лызлов А.Ф., Кошурникова Н.А.** Опыт первого предприятия атомной промышленности: уровни облучения и здоровье персонала // Природа. 1990. № 2.
47. **Никипелов Б.В., Лызлов А.Ф., Кошурникова Н.А.** Уровни облучения и отдаленные последствия // НИМБ. 1992. № 4. (Ядерное общество СССР).
48. **Дощенко В.Н.** Вся правда о радиации: Заметки врача из полукрытых сейфов. Озерск, 1991.
49. **Вдовенко В.М., Ершова З.В., Колычев Б.С., Фоминов В.В.** Радиохимия // Советская атомная наука и техника. М.: Атомиздат, 1967.
50. **Ершова З.В.** Мои встречи с академиком В.Г. Хлопиным (1924–1950 гг.) // [17].

51. **Мещеряков М.Г.** В.Г. Хлопин: восхождение на последнюю вершину // Природа. 1993. № 3.
52. Научные и технические основы ядерной энергетики / Пер. с англ. под ред. К. Гудмена. М.: Государственное изд-во иностр. лит., 1948 (Т. 1), 1950 (Т. 2).
53. **Спицын В.И., Балукова В.А.** и др. Изучение миграции радиоэлементов в грунтах // Тр. Второй междунар. конф. по проблеме использования атомной энергии. Женева, 1958. М.: Изд-во Главного управления по использованию атомной энергии при Совете Министров СССР, 1959. Т. 4.
54. **Докучаев Я.П.** Воспоминания об испытании первой плутониевой бомбы в СССР 29 августа 1949 г. в 6.30 утра на полигоне в Семипалатинской области. Ярославль: Ярославский гос. ун-т, 1992.
55. Советские ученые об испытании ядерного оружия. М.: Атомиздат, 1959.
56. Пояснительная записка к проекту закона Российской Федерации «О социальной защите граждан Российской Федерации, пострадавших в результате радиационных загрязнений» // Атом-пресса (Атомная энергетика). 1992. № 22.
57. **Ахлес А.В.** и др. Радиоактивное загрязнение окружающей среды в регионе Южного Урала и его влияние на здоровье населения / Под общ. ред. акад. Л.А. Булдакова. М.: ЦНИИатоминформ, 1991.
58. **Круглов А.К., Решетько Ю.В., Смирнов Ю.В.** О реабилитации радиационно-загрязненных территорий // Информационный бюллетень. 1992. № 10. (Центр общественной информации по атомной энергии).
59. **Емельянов В.С.** Таким я его знал // [11].
60. **Займовский А.С., Калашников В.В., Головин И.С.** Тепловыделяющие элементы атомных реакторов. М.: Госатомиздат, 1962.
61. **Агапова Н.П., Бочвар А.А., Займовский А.С.** и др. Атомное материаловедение // Советская атомная наука и техника. М.: Атомиздат, 1967.
62. **Харитон Ю.Б., Смирнов Ю.Н.** О некоторых мифах и легендах вокруг советских атомного и водородного проектов // [44].
63. **Губарев В.С., Ребров М.Ф., Мосин И.И.** Бомба. М.: ИздАт, 1993.
64. **Дубовский Б.Г.** и др. Критические параметры систем с делящимися веществами и ядерная безопасность: Справочник. М.: Атомиздат, 1966.
65. **Сохина Л.П.** Мои воспоминания о работе на химическом комбинате «Маяк»: Рукопись. (Челябинск-40, 1993 г.).
66. **Сохина Л.П., Колотинский Я.И., Халтурин Г.В.** Цена плутония: Документальная повесть о работе химико-металлургического цеха в период его становления: Рукопись. (Челябинск-40, 1991 г.).
67. **Гровс Л.** Теперь об этом можно рассказать. М.: Атомиздат, 1964.
68. **Жучихин В.И.** Первая атомная: Записки инженера-исследователя. М.: ИздАт, 1993.
69. БСЭ. Изд. 2-е. 1956. Т. 51; Т. 42.
70. Этюды к научному портрету А.Д. Сахарова // Природа. 1990. № 8. (Специальный выпуск).
71. **Круглов А.К., Рудик А.П.** Реакторное производство радиоактивных нуклидов. М.: Энергоатомиздат, 1985.
72. Экспериментальная ядерная физика / Под ред. Э. Сегре. М.: Иностран. лит., 1955. Т. II. С. 311.
73. **Полухин Г.А.** Первые шаги: История производственного объединения «Маяк». Челябинск-40, 1993.
74. **Круглов А.К., Ткач К.** Пионеры секретного атома // Атом-пресса (Атомная энергетика). 1993. № 10.

75. **Хохряков В., Романов С.** Влияние облучения на рак легких // НИМБ. 1992. № 4. (Ядерное общество).
76. **Хохряков В., Суслова К., Скрябин А.** Сравнительный анализ уровней накопления плутония в организме человека // Там же.
77. **Кошурникова Н.** и др. Эффект облучения у персонала ПО «Маяк» // Там же.
78. **Качерянец С.Г., Горин Н.Н.** Страницы истории ядерного центра «Арзамас-16». Арзамас-16: ВНИИЭФ, 1993.
79. Жизниописанием достопамятных людей земли русской X–XX вв. М.: Московский рабочий, 1992.
80. **Романов Ю.А.** «Отец» советской водородной бомбы // Природа. 1990. № 8.
81. Нормы радиационной безопасности НРБ-76/87 и Основные санитарные правила работы с радиоактивными веществами и другими источниками ионизирующих излучений ОСП-72/87. М.: Энергоатомиздат, 1988.
82. **Киссинджер Г.** Ядерное оружие и внешняя политика. М.: Иностран. лит., 1959.
83. **Юнг Р.** Ярче тысячи солнц. М.: Атомиздат, 1960.
84. **Кохран Т., Аркин У., Норрис Р., Сэнде Дж.** Ядерное вооружение СССР / Пер. с англ. М.: ИздАт, 1992.
85. **Суворов В.** Страна лимония. М.: Сов. Россия, 1989.
86. Химия актиноидов / Пер. с англ. под ред. Дж. Каца, Г. Сиборга и Л. Мориса. М.: Мир, 1991. Т. 1.
87. **Эклунд З.** Окло – атомный реактор 1800 млн. лет тому назад // Бюллетень МАГАТЭ. 1975. Т. 17, № 3.
88. Физика ядерных реакторов / Пер. с англ. М.: Атомиздат, 1964.
89. **Хапаев В., Гудков Е.** Тайны «жемчужины» Кавказа: Немские специалисты – участники создания отечественной атомной промышленности // Атом-пресса (Атомная энергетика). 1993. № 12.
90. **Галкин Н.П.** и др. Получение и обогащение гексафторида урана // Атомная наука и техника в СССР. М.: Атомиздат, 1977.
91. **Коэн К.** Разделение изотопов // [52], 1950. Т. 2.
92. **Петросьянц А.М.** Дороги жизни, которые выбирали нас. М.: Энергоатомиздат, 1993.
93. **Матвеев Л.В., Центр Э.М.** Уран-232 и его влияние на радиационную обстановку в ядерном топливном цикле. М.: Энергоатомиздат, 1985.
94. **Микерин Е.** Приоритетная подотрасль: Обогащенный уран остается важнейшей сферой деятельности Минатома России // Атом-пресса (Атомная энергетика). 1993. № 4.
95. **Прусаков В.Н.** Прогресс в разделении изотопов // Мат-лы юбилейной сессии Ученого совета РНЦ «Курчатовский институт» (Кикоинские чтения). М.: РНЦ «Курчатовский институт», 1993.
96. **Коцеев Н.А., Дергачев В.А.** Электромагнитное разделение изотопов и изотопный анализ. М.: Энергоатомиздат, 1989.
97. **Горин В.В., Красилов Г.А., Куркин А.И.** и др. Семипалатинский полигон: хронология подземных ядерных взрывов и их первичные радиационные эффекты (1961–1989 гг.) // Бюллетень Центра общественной информации по атомной энергии. 1993. № 9.
98. Исследования и разработки в реакторных научных центрах. М.: РНЦ «Курчатовский институт», 1993.
99. **Гончаров В.В.** Исследовательские реакторы: Создание и развитие. М.: Наука, 1986.
100. **Грейвс, Пакстон.** Критические массы систем из обогащенного урана // Пер. с англ. М.: Управление НТИ и выставок, 1958.

101. Атомная наука и техника в СССР: Юбилейный сборник. М.: Атомиздат, 1977.
102. У истоков советского Атомного проекта: роль разведки // Вопросы истории естествознания и техники. 1992. № 3.
103. **Серго Берия.** Мой отец — Лаврентий Берия. М.: Современник, 1994.
104. **Иойрыш А.И., Морохов И.Д., Иванов С.К.** А бомба. М.: Наука, 1990.
105. Ядерные реакторы для исследовательских целей: Мат-лы КАЭ США. М.: Изд-во иностр. лит., 1956.
106. **Круглов А.К.** К истории атомной науки и промышленности // Бюллетень Центра общественной информации по атомной энергии. 1993. № 12.
107. **Галанин А.Д.** Введение в теорию ядерных реакторов на тепловых нейтронах. М.: Энергоатомиздат, 1984.
108. **Андреев Б.М., Зельвенский Я.Д., Катыльников С.Г.** Тяжелые изотопы водорода в ядерной технике. М.: Энергоатомиздат, 1987.
109. Физический энциклопедический словарь. М.: Сов. энциклопедия, 1960 (Т. 1); 1966 (Т. 5).
110. **Якименко Л.М., Модылевская И.Д., Ткачек С.А.** Электролиз воды. М.: Химия, 1970.
111. **Ким Смирнов.** Слово об академике Александре. К сожалению прощальное // Известия. 1994. 5 февр.
112. **Алиханов А.И., Владимирский В.В., Никитин С.Я.** и др. Опытный физический реактор с тяжелой водой: Докл. на конф. по мирному использованию атомной энергии в Женеве. М.: Изд-во АН СССР, 1955.
113. **Гончаров В.В.** Экспериментальная база атомных реакторных центров и ее развитие // Исследования и разработки в реакторных научных центрах. М.: РНЦ «Курчатовский институт», 1993.
114. **Курносков В.А.** Всероссийскому объединению «ВНИИПИЭТ» 60 лет // Атом-пресса (Атомная энергетика). 1994. № 1.
115. **Петров П.А.** Ядерные энергетические установки. М.—Л.: Госэнергетическое изд-во, 1958.
116. В летописи отечества. Реактор для подлодки: Беседу с Е.П. Славским, В.Н. Чернавиным и А.П. Александровым записал капитан I ранга С. Быстров // Красная Звезда. 1989. 21 окт.
117. **Пятунин Б.А.** и др. Опыт демонтажа ядерных реакторов // Атомная энергия. 1989. Т. 69, вып. 3.
118. **Фетисов В.И.** ПО «Маяк» перед новым испытанием — конверсией // Атом-пресса (Атомная энергетика). 1993. № 31.
119. **Гордеев И.В., Кардашев Д.А., Малышев А.В.** Ядерно-физические константы: Справочник. М.: Госатомиздат, 1963.
120. **Горбачев В.М., Замятин Ю.С., Лбов А.А.** Основные характеристики изотопов тяжелых элементов. М.: Атомиздат, 1975.
121. **Иванов В.Е., Паширов И.И., Тихинский Г.В., Амоненко В.М.** Чистые и сверхчистые металлы (полученные методом дистилляции в вакууме). М.: Изд-во «Металлургия». 1965.
122. **Снегов С.** Творцы: Историческая повесть о современниках. М.: Сов. Россия, 1979.
123. **Качалов В.А., Пичугин В.В., Щегельский А.В.** Хронологический обзор истории Минсредмаша // Атом-пресса (Атомная энергетика). 1993. № 23.
124. **Грове Л.** Программа создания атомной бомбы; **Теллер Э.** Программа создания водородной бомбы // [30].
125. **Александров А.П.** Наука — стране: Статьи и выступления. М.: Наука, 1983.
126. **Пятов Е.** Урановые кладовые России: Пути развития минерально-сырьевой базы природного урана // Атом-пресса (Атомная энергетика). 1993. № 4.

127. 30 лет чехословацкой урановой промышленности. Прага, 1975.
128. Экспресс-информация. 1991. № 42. (ЦНИИАтоминформ).
129. **Кедровский О.Л., Скороваров Д.И.** Добыча и переработка урановых руд в СССР // Атомная наука и техника СССР. М.: Энергоатомиздат, 1987.
130. **Мосинец В.Н., Авдеев О.К., Медвигинский В.М.** Безотходная технология добычи радиоактивных руд. М.: Энергоатомиздат, 1987.
131. **Мосинец В.Н., Грязнов М.В.** Уранодобывающая промышленность и окружающая среда. М.: Энергоатомиздат, 1983.
132. **Ковда Г.А., Ласкорин Б.Н., Невский Б.В.** Технология переработки урановых руд // Советская атомная наука и техника. М.: Атомиздат, 1967.
133. **Ласкорин Б.Н.** и др. Комплексная переработка урановых руд: Разведка и добыча радиоактивного сырья // [90].
134. **Калабин А.И.** Добыча полезных ископаемых подземным выщелачиванием и другими геотехнологическими методами. М.: Атомиздат, 1981.
135. **Андреева О.С., Бадыйн В.И., Корнилова А.Н.** Природный и обогащенный уран: Радиационно-гигиенические аспекты. М.: Атомиздат, 1979.
136. Обращение к писателям, редакторам, журналистам и корреспондентам средств массовой информации по вопросу об интерпретации проблемы радиационной безопасности // Бюллетень Центра общественной информации по атомной энергии. 1993. № 8.
137. Энергетика: цифры и факты. М.: ЦНИИАтоминформ, 1993.
138. Экспресс-информация. 1993. № 35–36 (ЦНИИАтоминформ).
139. **Никителов Б.В.** Снижение потребности в природном уране // Атомная энергия. 1994. Т. 76, вып. 3.
140. **Каллистов А.Н.** Обстановка была чрезвычайной // Энергия. 1991. 17 мая. (г. Электросталь).
141. **Волгин Н.А.** Становление: Воспоминания, размышления: Рукопись. (М., 1993 г.)
142. **Каллистов А.Н.** Два важных события: Воспоминания бывшего директора машиностроительного завода // Энергия. 1991. 7 июня. (г. Электросталь).
143. История сибирского атома, история мира: В цифрах, фактах, воспоминаниях // Экспресс СВ, 1993.
144. **Флёров Г.Н.** Работы Академии наук СССР по реакторам с ураном-235, плутонием-239 и водородным замедлителем: Докл. на сессии АН СССР по мирному использованию атомной энергии, 1–5 июля 1955 г. М.: Изд-во АН СССР, 1955.
145. **Сергеев Г.Я., Титова В.В., Борисов К.А.** Металловедение урана и некоторых реакторных материалов. М.: Атомиздат, 1960.
146. **Брохович Б.В., Клименков В.И., Овчинников Ф.Я.** и др. Разборка опытного уран-графитового реактора для получения изотопов после его четырехлетней эксплуатации // Тр. Второй Междунар. конф. по мирному использованию атомной энергии. Женева, 1958. М.: Изд-во Главного управления по использованию атомной энергии при Совете Министров СССР, 1959. Т.2.
147. **Губарев В.С.** Челябинск-70. М.: ИздАт, 1993.
148. **Ритус В.И.** Если не я, то кто? // Природа. 1990. № 8.
149. **Самойлов А.Г., Каштанов А.И., Волков В.С.** Дисперсионные твэлы: Конструкция и работоспособность. М.: Энергоатомиздат, 1982.
150. Атом-пресса (Атомная энергетика). 1993. № 45.
151. **Иевлев Л.** Дезинтеграция как угроза безопасности // Посев. 1992. № 2.
152. **Корякин Ю.И.** Российский ядерно-энергетический тупик: есть ли выход? // Энергетическое строительство. 1993. № 7.

153. О состоянии и проблемах обеспечения безопасности российских ядерных установок // Бюллетень Центра общественной информации по атомной энергии. 1994. № 4. С. 24.
154. Известия. 1992. 2 дек.
155. Ликвидация последствий промышленных аварий, связанных с выбросом радиоактивных отходов: Обзор. М.: ЦНИИАтоминформ, 1992.
156. **Круглов А.К., Смирнов Ю.В.** Ядерные катастрофы, их последствия и перспективы развития атомной энергетики. М.: ЦНИИАтоминформ, 1992.
157. **Каратыгин А.А.** Воспоминания 1940–1978 гг.: Рукопись. (Обнинск, 1978 г.)
158. Атом-пресса. (Атомная энергетика). 1992. 20 июля.
159. **Мак-Каллах, Миллс, Теллер.** Безопасность ядерных реакторов // Мат-лы Междунар. конф. по мирному использованию атомной энергии, состоявшейся 8–20 августа 1955 г. Т. 13. М.: Изд-во иностр. лит., 1958.
160. **Круглов А.К.** К истории атомной науки и промышленности // Бюллетень Центра общественной информации по атомной энергии. 1993. № 8. С. 56–57.
161. **Гончаров В.В.** Работы по физике и технике исследовательских реакторов: Исследования и разработки в реакторных научных центрах. М.: РНЦ «Курчатовский институт», 1993.
162. **Кипин и Уимент.** Запаздывающие нейтроны // Мат-лы Междунар. конф. по мирному использованию атомной энергии, состоявшейся 8–20 августа 1955 г. М.: Изд-во АН СССР, 1958.
163. **Кап Ф.** Физика и техника ядерных реакторов // Пер. с нем. М.: Изд-во иностр. лит., 1960.
164. **Дитрих.** Экспериментальное определение саморегулирования и безопасности реакторов с водяным замедлителем // [159].
165. **Медведев Г.** Ядерный загар. М.: Изд-во Книжной палаты, 1990.
166. **Сидоренко В.А.** Вопросы безопасной работы реакторов ВВЭР. М.: Атомиздат, 1977.
167. **Емельянов И.Я., Егизаров М.Б., Рябов В.И.** и др. Физический пуск реактора РБМК второго блока Ленинградской АЭС им. В.И. Ленина // Атомная энергия. 1976. Т. 40, вып. 2.
168. **Дубовский Б.Г., Круглов А.К.** и др. Ядерная безопасность при использовании делящихся материалов // [101].
169. Положение о Государственном комитете СССР по надзору за безопасным ведением работ в атомной энергетике: Утв. постановлением Совета Министров СССР от 4 мая 1984 г. № 409.
170. **Харитон Ю.Б., Смирнов Ю.Н.** Мифы и реальность Советского атомного проекта. Арзамас-16, 1994.
171. **Терлецкий Я.П.** Операция «Допрос Нильса Бора» // Вопросы истории естествознания и техники. 1994. № 2. С. 18–44.
172. **Михайлов В.Н.** «Я — ястреб». М.: Крон-Пресс, 1993.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
ГЛАВА 1.	
Предвоенный период (1918–1941 гг.)	17
ГЛАВА 2.	
Военный период (1941–1945 гг.)	26
ГЛАВА 3.	
Начало создания в СССР ядерного оружия.	36
Создание ядерного реактора Ф-1	42
ГЛАВА 4.	
Первый промышленный ядерный реактор А	53
Строительство и пуск реактора	61
Трудности эксплуатации первого промышленного реактора	69
Промышленный реактор — первая исследовательская база	77
Дозовые нагрузки персонала первого промышленного реактора	80
ГЛАВА 5.	
Первый радиохимический завод Б	85
Проектирование и строительство	93
Начальный период работы	97
Изменение уровней облучения эксплуатационного персонала	102
Сбросы радиоактивности в естественные водоемы и их последствия	106
ГЛАВА 6.	
Первый завод В по производству ядерных зарядов	112
О дополнительных требованиях к конечной продукции завода В	119
Разработка проекта создания завода В и освоение технологии	125
Последствия внутреннего облучения	133
ГЛАВА 7.	
Завершающий этап создания первой плутониевой бомбы. Семипалатинский полигон	138
Проблемы нейтронного запала	147

Подготовка и испытание	151
Эффективность взрыва и последствия	158
ГЛАВА 8.	
Получение обогащенного ^{235}U и освоение его производства в промышленных масштабах	161
О вкладе советских и немецких ученых в решение урановой проблемы в СССР	163
Создание комбината № 813 для получения ^{235}U	168
Получение шестифтористого урана	178
Сложности пускового периода газодиффузионного завода комбината № 813	181
Центробежный и электромагнитный методы разделения изотопов	191
Главные потребители обогащенного ^{235}U	200
ГЛАВА 9.	
О первых в нашей стране ядерных реакторах с тяжелой водой	203
Создание лаборатории № 3 АН СССР	207
О некоторых свойствах тяжелого водорода и получении D_2O	211
Исследовательский тяжеловодный ядерный реактор лаборатории № 3	219
Первый проектный институт в атомной промышленности	227
Обоснование разработки проекта промышленного реактора и основные исполнители	230
Пусконаладочные работы и начальный период эксплуатации реактора	235
О некоторых преимуществах и недостатках тяжеловодных реакторов	240
ГЛАВА 10.	
Обеспечение атомной программы природным ураном	250
Развитие комбината № 6 и урановых рудных районов на территории страны	259
Переработка урановых руд	270
Загрязненность территорий и охрана окружающей среды в уранодобывающей промышленности	279
ГЛАВА 11.	
Первый завод по получению изделий из металлического урана и других материалов для использования в атомной промышленности	285
Вклад Гиредмета и НИИ-9 в создание атомной промышленности	287

Реконструкция завода № 12	294
Другие материалы и изделия для создания ядерного и термоядерного оружия	304
ГЛАВА 12.	
К истории ядерной и радиационной безопасности	315
Общие проблемы безопасности в начальный период создания атомной промышленности	321
Первые ядерные аварии при работе с делящимися материалами	324
Минимальные критические массы и размеры ядерно-безопасного оборудования	328
Ядерная и радиационная безопасность при эксплуатации реакторных установок	339
Радиационная безопасность при восстановлении реактора АИ	342
Аварии с потерей управления реактором	344
Ядерная безопасность реакторов при локальной критичности	349
Первые государственные службы радиационной и ядерной безопасности	352
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	359
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	370

АРКАДИЙ КОНСТАНТИНОВИЧ
КРУГЛОВ

КАК СОЗДАВАЛАСЬ
АТОМНАЯ ПРОМЫШЛЕННОСТЬ В СССР

Редактор Е. И. Х о д а к о в а
Художественный редактор А. П. Б а б а н и н а
Корректор Е. М. С п и р и д о н о в а
Компьютерная верстка Г. В. Т а р а н е н к о

Издательство ЦНИИАтоминформ ЛР № 020359 от 27.12.91

Подписано в печать 26.12.94	Формат 60х84 1/16.	Печать офсетная.
Усл. печ. л. 24,5	Уч.-изд. л. 19,0	Тираж 3000 экз. Заказ № 11

Отпечатано в ЦНИИАтоминформе
127434, Москва, а/я 971

ЦНИИ АТОМИНФОРМ



**ГОЛОВНАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ
МИНАТОМА РОССИИ
В ОБЛАСТИ
ИНФОРМАЦИОННОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ
ПРЕДПРИЯТИЙ,
ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОГО АНАЛИЗА
ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ОТРАСЛИ,
КОНВЕРСИОННЫХ ПРОГРАММ,
СОЗДАНИЯ
БОЛЬШИХ ИНФОРМАЦИОННЫХ
И УПРАВЛЯЮЩИХ СИСТЕМ.**

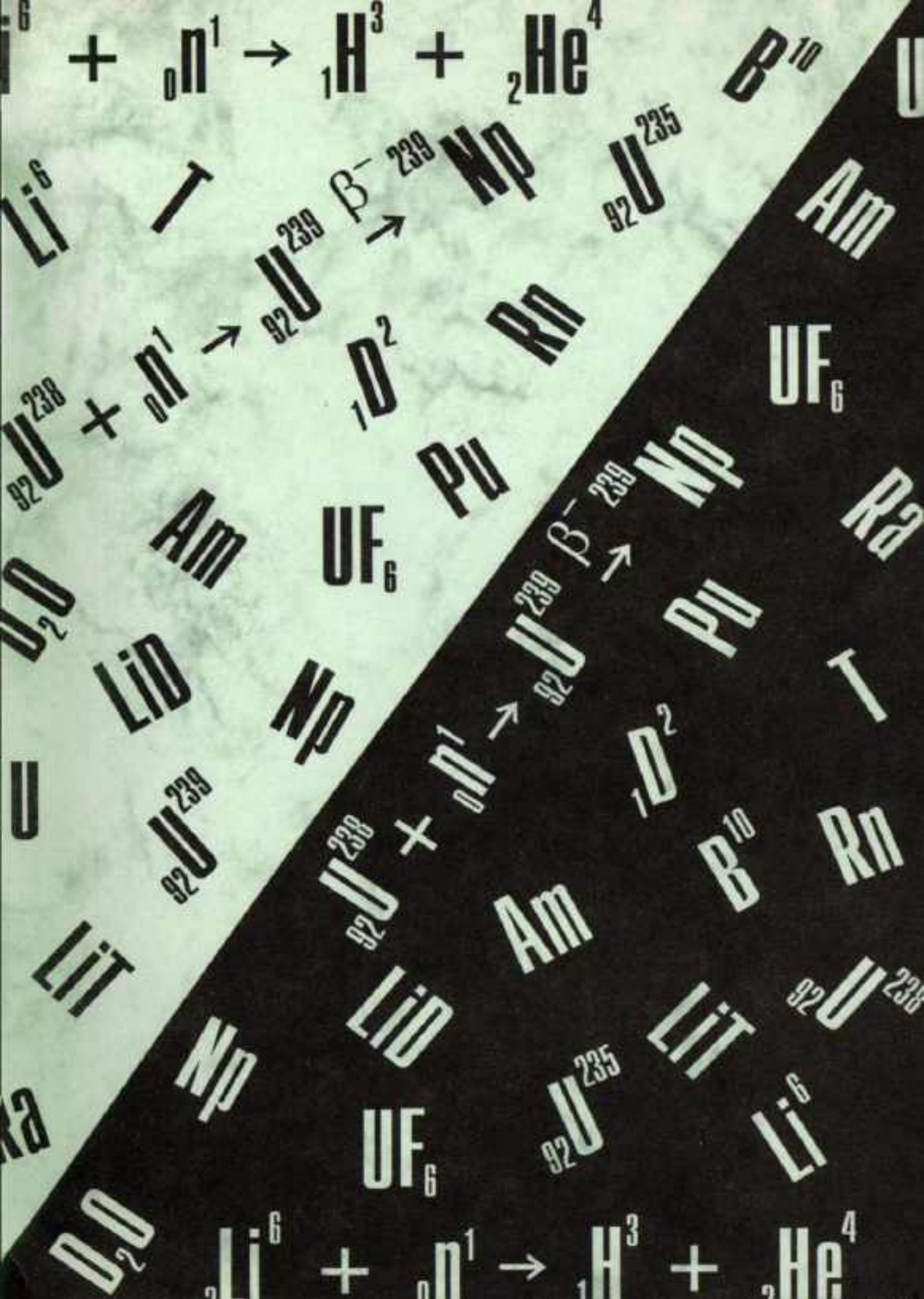


**ОБЕСПЕЧИТ ВАС
ДОСТОВЕРНОЙ ИНФОРМАЦИЕЙ
О ПРОДУКЦИИ ПРЕДПРИЯТИЙ
МИНАТОМА РОССИИ,
ПОМОЖЕТ ОСУЩЕСТВИТЬ
НЕПОСРЕДСТВЕННУЮ СВЯЗЬ
С РАЗРАБОТЧИКАМИ
И ИЗГОТОВИТЕЛЯМИ,
ПРОВЕСТИ КОММЕРЧЕСКИЕ ОПЕРАЦИИ,
ЗАКЛЮЧИТЬ ХОЗЯЙСТВЕННЫЕ ДОГОВОРЫ,
НАЛАДИТЬ ВЗАИМОВЫГОДНЫЙ ОБМЕН
НАУЧНЫМИ ИДЕЯМИ И КАДРАМИ,
ПОДГОТОВИТЬ КОНФЕРЕНЦИИ
И ВЫСТАВКИ,
РАЗМЕСТИТЬ ВАШУ РЕКЛАМУ
В НАШИХ ИЗДАНИЯХ,
ПРИМЕТ ЗАКАЗЫ НА РЕДАКЦИОННО-
ИЗДАТЕЛЬСКИЕ
И ТИПОГРАФСКИЕ РАБОТЫ
С ПРЕДОСТАВЛЕНИЕМ БУМАГИ.**

НАШ АДРЕС:

Российская Федерация,
127434, Москва,
а/я 971

Телефон: (095) 976-79-39
Телетайп: 114088 ЗАЛИВ
Факс: (095) 976-72-03



Автор — лауреат
Государственной премии,
более 40 лет
проработавший
в атомной
промышленности,
впервые знакомит
читателей
с историей рождения
второй
ядерной державы

Москва
ЦНИИАТОМИНФОРМ