



# **ЯДЕРНАЯ ЭНЕРГЕТИКА**

***Н. А. Азаренков, Л. А. Булавин***

***И. И. Залюбовский***

***В. Г. Кириченко***

***И. М. Неклюдов***

***Б. А. Шиляев***

**Харьков – 2012**

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ  
УКРАИНЫ  
ХАРЬКОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ИМЕНИ В. Н. КАРАЗИНА**

*Н. А. Азаренков*

*Л. А. Булавин*

*И. И. Залюбовский*

*В. Г. Кириченко*

*И. М. Неклюдов*

*Б. А. Шиляев*

**ЯДЕРНАЯ ЭНЕРГЕТИКА  
ГЛАВА 1. СТАНОВЛЕНИЕ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ И ЭНЕРГЕТИКИ**

*Учебное пособие для студентов старших курсов,  
аспирантов и научных работников*

**Харьков - 2012**

УДК 621.039

ББК 31.4

Я –34

*Утверждено к печати решением ученого совета  
Харьковского национального университета имени В. Н. Каразина  
(протокол № 4 от 29.04.2011 г.)*

**Рецензенты:**

академик НАНУ, доктор физико-математических наук, профессор В. Е. Сторишко,  
Институт прикладной физики НАНУ;  
член-корреспондент НАНУ, доктор физико-математических наук, профессор,  
В. И. Слисенко, Институт ядерных исследований НАНУ;  
академик НАНУ, доктор физико-математических наук, профессор Н. Ф. Шульга,  
Национальный научный центр «ХФТИ»

**Я –34 Ядерная энергетика:**

учебное пособие, Азаренков Н. А., Булавин Л. А., Залюбовский И.И.,

Кириченко В. Г., Неклюдов И. М., Шиляев Б. А. – Х. : ХНУ имени В. Н. Каразина, 2012. –  
535 с.

В пособии изложены основы функционирования ядерной энергетики и перспективы ее развития в XXI веке. Приведены основные исторические вехи создания и развития ядерной физики и энергетики, рассмотрены основы реакций деления и принципы создания реакторов различных типов. Рассмотрены типовые конструкции атомных электростанций и ядерных энергетических установок. Проанализированы способы создания замкнутого ядерного топливного цикла и перспективных типов ядерных реакторов.

Для студентов старших курсов, аспирантов и научных работников физико-технических и физико-энергетических специальностей.

Табл. 82. Ил. 274. Библиогр.: 48 назв.

УДК 5621.039

ББК 31.4

©Харьковский национальный университет имени В. Н. Каразина, 2012

ISBN 978-613-0-11482-4

© Азаренков Н. А., Булавин Л. А., Залюбовский И. И.,

Кириченко В. Г., Неклюдов И. М., Шиляев Б. А., 2012

© Дончик И. Н. дизайн обложки, 2012

## СОДЕРЖАНИЕ

	<b>ПРЕДИСЛОВИЕ</b>	5
	<b>ВВЕДЕНИЕ</b>	6
<b>ГЛАВА 1.</b>	<b>Становление ядерной физики и энергетики</b>	12
§ 1.1.	<i>Открытие радиоактивности. Радиоактивность и уран</i>	12
§ 1.2.	<i>Энергия ядра атома</i>	17
§ 1.3.	<i>Радиоактивные элементы в периодической системе</i>	20
§ 1.4.	<i>Первые ядерные реакции. Открытие нейтрона</i>	25
§ 1.5.	<i>Искусственная радиоактивность</i>	35
§ 1.6.	<i>Нейтрон в действии. Деление урана. Плутоний</i>	37
§ 1.7.	<i>Цепная ядерная реакция деления урана</i>	49
§ 1.8.	<i>Создание первых ядерных реакторов</i>	55
§ 1.9.	<i>Первые атомные станции</i>	60
§ 1.10.	<i>Хронология важнейших открытий в области радиоактивности</i>	64
	<b>Вклейка 1</b>	71
	<b>ЛИТЕРАТУРА</b>	79
	<b>СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ</b>	80

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Открытие ядерных цепных реакций, развитие ядерной физики и науки о материалах – делящихся, конструкционных, металлических и керамических – привело к созданию ядерной энергетики (*nuclear energetics*) и прогрессирующему росту выработки электроэнергии на атомных электростанциях (АЭС).

Практическая ценность ядерной энергетики определяется не только низкой себестоимостью и высокой рентабельностью выработки электроэнергии, но и созданием глобальной отрасли – ядерного топливного цикла. Ядерный топливный цикл (*nuclear fuel cycle*) – это комплекс мероприятий для обеспечения функционирования ядерных реакторов, осуществляемых в системе предприятий, связанных между собой потоком ядерного материала. Ядерный топливный цикл (ЯТЦ) включает урановые рудники, заводы по переработке урановой руды, конверсии урана, обогащению и изготовлению топлива, ядерные реакторы, хранилища отработавшего ядерного топлива (ОЯТ), заводы по переработке отработавшего топлива и связанные с ними промежуточные хранилища и хранилища для захоронения радиоактивных отходов.

Особенное значение ядерная энергетика и проблема развития ЯТЦ имеют для Украины. Более 50% всей электрической энергии Украины производится на 15 ядерных блоках украинских АЭС – Запорожской, Ровенской, Хмельницкой и Южноукраинской. Использование АЭС значительно снижает выбросы CO<sub>2</sub> в атмосферу, способствует введению экологически чистых энергозамещающих мощностей, удешевлению производства энергозатратной продукции и т.п.

Важной проблемой является подготовка квалифицированных грамотных специалистов для ядерной отрасли. В связи с этим и подготовлена представляемая вниманию специалистов, аспирантов, студентов данная книга. Мы надеемся, что она будет интересна и полезна для всех, кого волнует будущее энергетики и будущее нашего мира.

*Авторы*

## ВВЕДЕНИЕ

Ядерная энергетика в техническом, научном, экологическом и социальном аспектах демонстрирует наряду со значительным прогрессом в развитии ядерных технологий и материалов наличие ряда проблем вследствие неопределенности экономических перспектив в глобальном мире и потенциальной равноценности альтернативных технических решений в области энергетики.

Электрическая и тепловая энергия, получаемая в результате ядерного деления, может обеспечить большую долю энергетических требований глобального мирового сообщества. Ядерное топливо является одним из гарантированных топливных и экономических ресурсов для производства энергии. С 1942 г. научные и технологические программы по исследованиям и разработке ядерных энергетических систем, атомных электрических станций, ядерных энергетических установок позволили достичь уровня, необходимого для обеспечения энергией основной доли человечества. Последние разработки позволяют достичь более полного использования ресурсов урана и тория и меньших потерь энергии продуктов деления. Изучение и разработка материалов для ТВЭЛов и других систем ядерных реакторов будут определяющим образом влиять на дальнейший технический уровень ядерной энергетики.

Разработка материалов органично входит в опытно-конструкторские исследования систем, производящих энергию, и процессов, связанных с переработкой облученного топлива. Выявившиеся к настоящему времени цели, тенденции, достижения и трудности имеют свою предысторию. При использовании новых материалов обнаруживаются новые факторы. Со своей стороны исследование новых явлений создаст потребность в новых материалах. Совокупность таких взаимосвязей является движущим стимулом технического прогресса в ядерной энергетике.

Урановая руда не может быть использована непосредственно для извлечения энергии, как это происходит при сжигании угля, нефти или газа. Чтобы иметь топливо для ядерного реактора, необходима целая цепочка технологических операций от извлечения урановой руды из земных недр, ее обогащения и получения ок-

сида урана до обогащения ураном-235 и изготовления топливных таблеток, тепловыделяющих элементов (ТВЭЛов) и тепловыделяющих сборок. Для этого требуется создать атомную индустрию от горно-обогатительного комбината до хранилищ отработавшего ядерного топлива атомных электростанций или продуктов его переработки – радиоактивных отходов. Отработавшее ядерное топливо и радиоактивные отходы представляют собой смесь высоко - радиотоксичных элементов с очень низкой предельно допустимой концентрацией в воде и воздухе, которые должны изолироваться от биосферы. Иными словами, нужно создать ядерный топливный цикл атомной энергетики, что требует значительных капиталовложений.

Создание атомной индустрии явилось историческим примером решения общенациональных проблем, в котором принимали участие не только ученые, но и политики различных рангов. Опыт эксплуатации первых АЭС показал реальность и надежность ядерно-энергетической технологии для промышленного производства электроэнергии. Наиболее развитые индустриальные державы приступили к проектированию и строительству АЭС с реакторами разных типов в порядке промышленного эксперимента. К 1964 г. суммарная мощность АЭС достигла 5000 МВт, т.е. за 10 лет возросла в 1000 раз. Основным итогом развития атомной энергетики за этот период времени заключался в том, что себестоимость электроэнергии АЭС и тепловых электростанций оказалась равной. С этого времени атомная энергетика начинает вносить заметный вклад в общее производство электроэнергии.

Развитие цивилизации, потребности производства ставили перед учеными и инженерами задачи познания тепловых, электрических и магнитных явлений, радиоактивности и использования их на практике.

К началу XX в. возникли необходимые условия для дальнейшего широкого развития электроэнергетики: были созданы эффективные паровые и гидравлические турбины, электрические генераторы переменного тока, построены и успешно эксплуатировались первые тепловые и гидроэлектростанции, линии электропередач высокого напряжения. Полученный опыт применения электроэнергии

продemonстрировал ее огромные технологические преимущества благодаря использованию при ее производстве различных видов первичной энергии (возобновляемых и невозобновляемых), преобразуемых во вторичную энергию, и передаче ее на большие расстояния. При этом в производство электроэнергии вовлекались масштабные энергоресурсы, такие как уголь, торф, нефть, газ, гидравлическая энергия. Были доказаны высокая эффективность электричества, обеспечивающего свет, тепло, механическую энергию, возможность многофункционального его использования в промышленности, транспорте, сельском хозяйстве, в быту и т.д.

Таким образом, были созданы условия для наступления эры современной электроэнергетики. С начала XX в. стремительное развитие электроэнергетики стало основой роста экономики и повышения качества жизни людей. Важнейшее значение имеет электроэнергетика в структурной перестройке энергетического комплекса с широким внедрением электротехнологий, благодаря чему достигается многократное снижение энергозатрат и выбросов загрязняющих веществ в окружающую среду.

Большое влияние на развитие энергетики оказали открытие явления радиоактивности и овладение ядерной энергией. История познания основ ядерной техники, освоения человеком тепловой, электрической и атомной энергии, создания первых электростанций, линий электропередач и объединенных энергосистем, развития электротехнологий и использования электроэнергии отражает огромные достижения человечества в изучении окружающего мира, которые обеспечили наступление эры современной электроэнергетики.

Имеющаяся литература по ядерной энергетике слишком обширна, чтобы ее можно было исчерпывающим образом проанализировать в рамках настоящего издания. Число статей и отчетов давно перевалило за 150000. Исследования и разработки по ядерным материалам, связанные с этими проблемами, проводятся во многих лабораториях, институтах, университетах почти 40 стран мира. Мы попытались рассмотреть основные достижения и проблемы ядерной энергетики.



Интенсивные программы прикладных исследований, разработок, конструирования, экономических исследований, вопросов безопасности и защиты окружающей среды подготовили ядерные реакторы деления к ключевой роли в вопросе обеспечения человечества энергией. Это произошло в то время, когда стало очевидным, что запасы нефти и природного газа ограничены. Чистое горючее, получаемое из угля, нефтеносных сланцев и других «резервных» ископаемых, вскоре окажется в несколько раз дороже углеводородных горючих. Уран и торий в принципе могут давать энергию, с экономической точки зрения в сотни раз более дешевую, чем выработанная из горючих видов топлива. Различные аспекты развития ядерной энергетики и топливных циклов детально обсуждались на международных конференциях. К сожалению, имеются обстоятельства, которые делают будущее ядерной энергетики неопределенным. Среди них – экологическая и социальная неопределенность и напряженность, обусловленная многочисленными ядерными испытательными взрывами и авариями при создании ядерного оружия и ядерной энергетики. До 730 ядерных испытаний, проведенных на испытательных полигонах в США, Китае, Франции, Индии и Пакистане, зарегистрировано за полвека с 13 мая 1958 года.

Авария на АЭС «Тримайл-Айленд» (1971 г.), Чернобыльская катастрофа (1986 г.), аварии на японских АЭС в марте 2011 г., произошедшие вследствие 9-балльного землетрясения с эпицентром в несколько сотен километров от них, – все эти события свидетельствуют, что за последние 40 лет ядерная энергетика не достигла полной 100% гарантии ядерной радиационной безопасности.

В связи с этим на новом этапе технического развития возникает ряд требований к ядерно-энергетическим системам (ЯЭС):

- гарантированная безопасность;
- экономическая эффективность;
- отсутствие ограничений по сырьевой базе на исторически значимый период времени;
- обращение с ОЯТ и РАО – организация топливного цикла ЯЭ должна обеспечивать безопасную окончательную изоляцию РАО;

- масштаб энергопроизводства – доля на рынке электроэнергии в стране не менее 30–50%;
- структура энергопроизводства должна обеспечивать возможность расширения рынков сбыта.

При этом очень важна концепция безопасности – защита населения и окружающей сред от радиационной опасности путем:

- эффективного функционирования законодательного блока – законов, норм и правил, государственной разрешительной системы и независимого ядерного регулирования;
- совершенствование культуры безопасности, расстановка приоритетов и учет человеческого фактора;
- создания базы знаний о процессах и явлениях;
- совершенствования технологического обеспечения безопасности и эшелонированных защитных барьеров ЯТЦ.

В случае ядерной энергетики Украины эти задачи дополняются следующими пунктами:

1. Оценки радиологической обстановки и мониторинг на территории Чернобыльской зоны и прилегающих к нему регионов.
2. Радиоэкологии регионов, где имеются предприятия атомной промышленности и атомные установки.
3. Комплексная оценка состояния здоровья людей, проживающих в населенных пунктах, прилегающих к Чернобыльской зоне.
4. Создание геоинформационной системы по Чернобыльской зоне.
5. Исследования по проблемам проектирования, сооружения и снятия АЭС с эксплуатации.
6. Разработка технологий и системы обращения с радиоактивными отходами и отработанным ядерным топливом.
7. Ядерная физика и радиационное материаловедение в области ядерной энергетики.

8. Фундаментальные исследования, направленные на решение задач по повышению безопасности и эффективности ядерной энергетики и промышленности.

9. Разработка и реализация технологий производства реакторных радиоизотопов. Разработка и развитие ядерно-физических методов для решения практических задач в геологии, металлургии и радиоэкологии.

10. Подготовка специалистов для ядерной отрасли. Укрепление материально-технической базы учебных заведений, готовящих кадры для атомной отрасли.

11. Привлечение ведущих ученых и специалистов к подготовке кадров.

Одним из приоритетных направлений деятельности является развитие ядерно-физических методов и наукоемких технологий. Ядерные и радиационные технологии прочно заняли свое место в современной экономике. Развитие и применение таких технологий позволит отказаться от многих малоэффективных и трудоемких традиционных разработок, применяемых в медицине, промышленности и сельском хозяйстве.

Предлагаемое издание будет использоваться при освоении учебных курсов: «Физико-технологические основы ядерного топливного цикла», «Физика ядерных реакторов», «Радиационное материаловедение», «Физика радиационных явлений», «Атомная и ядерная физика».

# ГЛАВА 1. СТАНОВЛЕНИЕ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ И ЭНЕРГЕТИКИ

## § 1.1. Открытие радиоактивности. Радиоактивность и уран

Современное состояние ядерной энергетики сложно понять, не зная истории ее становления. Открытие радиоактивного распада, обнаруженного при изучении фосфоресцирующих свойств урановых соединений, исследование естественной и искусственной радиоактивности, открытие электрона, протона, нейтрона и нового вида ядерных превращений – реакции деления ядра урана, – все это послужило развитию представлений о ядерной энергии. Существенным является то, что деление урана сопровождается испусканием нейтронов, способных вызвать деление других ядер урана. Таким образом, один нейтрон может инициировать цепную ядерную реакцию – разветвленную цепь делений ядер, число которых будет возрастать с огромной скоростью. Один тепловой нейтрон с энергией 0,025 эВ ( $1 \text{ эВ} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$ ) высвобождает при делении одного ядра урана энергию около 200 МэВ. На основе уникальных ядерных свойств урана и плутония и создана ядерная энергетика, обеспечившая качественный скачок в энергообеспечении человечества.

История ядерной энергетики началась в конце 19 века трудами Д. И. Менделеева, А. Беккереля, М. Склодовской, Э. Резерфорда, Г. Мозли, Ф. Содди.

К этому времени представления об атомном и молекулярном строении материи получили широкое распространение. При изучении электрического разряда в газах низкого давления были обнаружены катодные лучи, созданы разрядные трубки Крукса, создана химическая символика элементов, разработаны методы определения относительных атомных масс химических элементов. После утверждения представлений об атомно-молекулярном строении материи важнейшим событием стало открытие в 1869 г. гениальным русским ученым Д. И. Менделеевым периодического закона последовательного изменения физических и химических свойств элементов в зависимости от их атомной массы. Успех предложенного Менделеевым расположения элементов состоит в том, что он придавал особое значение периодичности физико-химических свойств.

В случае нарушения периодичности Менделеев утверждал, что в одних случаях атомные веса ошибочны, а в других – должны существовать еще не открытые элементы. Это подтвердилось в случае Sc, Ga, Ge. Исследования флюоресценции природных неорганических солей, в частности, урановых (точнее ураниловых) соединений под воздействием света, которые в 1895 г. проводил Анри Беккерель, стимулировало предположение Анри Пуанкаре о том, что процесс флюоресценции может сопровождаться испусканием рентгеновских лучей. Возникла перспектива получения рентгеновского излучения, используя явление флюоресценции.

*Антуан Анри Беккерель (1852–1908), французский физик, парижанин. В 1875 г. он приступил к изучению влияния магнитных полей на линейно-поляризованный свет, начал педагогическую деятельность в Политехнической школе. В середине 1880-х гг. Беккерель разработал новый метод анализа оптических спектров. В 1888 г. он получил докторскую степень за диссертацию о поглощении света в кристаллах. В 1896 г. открыл лучи Беккереля, явление получившее название радиоактивность (от лат. radio – излучаю, radius – луч и activus – действенный). В 1899 г. он был избран членом Французской академии наук (вклейка 1, рис. 1).*

А. Беккерель решил проверить гипотезу Пуанкаре, используя наиболее сильно флюоресцирующие материалы – соли урана. Беккерель установил, что защищенные от света фотопластинки, находящиеся в контакте с солями урана засвечиваются. Обнаружение этого явления 1 марта 1896 г. традиционно считается открытием радиоактивности.

Многократное повторение экспериментов подтвердило, что это явление вызывается невидимым излучением, проходящим через непрозрачные тела. Все исследованные урановые соединения засвечивали фотопластинки вне зависимости от того, обладали они флюоресценцией, или нет, при этом интенсивность излучения не изменялась в течение многих месяцев, способствуя разрядке наэлектризованного электроскопа. Беккерель показал, что излучение урановых солей разряжает наэлектризованные тела в воздухе независимо от потенциала и знака заряда. Используя металлический уран, А. Беккерель 18 мая 1896 г. экспериментально доказал, что источником «урановых лучей» является элемент уран.

Уран, как и большинство химических элементов, имеет удивительную биографию. Он открывался трижды. М. Клапрот в 1789 г. в Берлине выделил уран из руды, которая называется «урановая смолка». Э. Пелиго в 1841 г. получил уран в чистом виде, показав, что Клапрот принимал за металл его оксид. Вследствие неверной оценки атомного веса урана возникли трудности при помещении его в периодическую систему элементов: свойства урана не соответствовали месту в таблице, положенному ему, исходя из его атомного веса. Д. И. Менделеев смело переместил уран в таблице, изменив его атомный вес, что вскоре подтвердилось экспериментально. Уран стал самым последним и самым тяжелым элементом периодической системы.

Менделеев не только содействовал третьему рождению урана, он ожидал от него неожиданностей. Пророчеством оказались слова Д. И. Менделеева, написанные им в конце своей жизни: «Убеденный в том, что исследование урана, начиная с его природных источников, поведет к еще многим новым открытиям, я смело рекомендую тем, кто ищет предметов для новых исследований, особо тщательно заниматься урановыми соединениями». Эти пророческие слова сбылись в великих открытиях XX столетия: была открыта и осуществлена реакция деления урана и обнаружено его спонтанное (самопроизвольное) деление.

Таким образом, радиоактивность – это самопроизвольное (спонтанное) превращение неустойчивого изотопа химического элемента в другой изотоп (обычно – изотоп другого элемента). Сущность явления состоит в самопроизвольном изменении состава атомного ядра, находящегося в основном состоянии либо в возбуждённом долгоживущем (метастабильном) состоянии. Такие превращения сопровождаются испусканием ядрами элементарных частиц либо других ядер, например  $\alpha$ -частиц. Все известные типы радиоактивных превращений являются следствием сильных или слабых взаимодействий. Первые ответственны за превращения, сопровождающиеся испусканием ядерных частиц, например  $\alpha$ -частиц, протонов или осколков деления ядер; вторые проявляются в  $\beta$ -распаде ядер.

Условно нижней границей продолжительности жизни радиоактивных ядер считается время порядка  $10^{-12}$  с. Все известные виды радиоактивности можно разделить на две группы: элементарные (одноступенчатые) превращения и сложные (двухступенчатые).

К первой группе относятся:  $\alpha$ -распад; все варианты  $\beta$ -распада (с испусканием электрона, позитрона или с захватом орбитального электрона); спонтанное деление ядер; протонная радиоактивность; двупротонная радиоактивность; и двунейтронная радиоактивность. К двухступенчатым радиоактивным превращениям относят процессы испускания запаздывающих частиц: протонов, нейтронов,  $\alpha$ -частиц, ядер трития и  $^3\text{He}$ , а также запаздывающее спонтанное деление.

После открытия Беккерелем испускания ураном неизвестного вида проникающего излучения, названного им радиоактивным, была обнаружена радиоактивность тория. В 1898 супруги М. Кюри и П. Кюри открыли два новых радиоактивных элемента – полоний и радий.

**Мария Склодовская-Кюри** (1867–1934) – первая женщина-физик, удостоенная Нобелевской премии, и первый ученый, удостоенный этой премии дважды. Родилась в Варшаве, в Сорбонне получила степень по физике и математике. Занимаясь исследованием намагниченности стали познакомилась с П. Кюри, с которым вскоре вступила в брак. Общие научные интересы и плодотворная работа привели к получению совместно с А. Беккерелем и П. Кюри в 1903 г. Нобелевской премии. Первая женщина – профессор Сорбонны, автор фундаментального труда «Радиоактивность». В 1911 г. Мария Кюри получает вторую Нобелевскую премию по химии за открытие радия и полония. Создала Институт Радия в Париже (вклейка 1, рис. 2).

**Пьер Кюри** (1859–1906) выдающийся французский физик, Нобелевский лауреат. В шестнадцать лет получил степень бакалавра Сорбонны, через два года – магистра. В 1880 г. открыл пьезоэлектрический эффект. С 1883 г. занимался физикой кристаллов, сформулировал принцип Кюри. Установил зависимость между открытым существованием температуры, выше температурой и намагниченностью (закон Кюри), которой исчезают ферромагнитные свойства (точка Кюри). Совместно с М. Склодовской-Кюри открыл биологическое действие радиоактивности, элементы  $\text{Po}$  и  $\text{Ra}$ , выдвинул теорию радиоактивного распада. Профессор Сорбонны, академик (вклейка 1, рис. 3).

Большое значение в изучении радиоактивности имеют радиоактивные минералы, т. е. минералы, содержащие природные радиоактивные элементы (дол-

гоживущие изотопы радиоактивных рядов  $^{238}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$  и  $^{232}\text{Th}$ ) в количествах, существенно превышающих величины их среднего содержания в земной коре (кларки). Известно около 250 радиоактивных минералов содержащих уран, торий либо оба эти элемента. Наличие радиевых минералов достоверно не установлено. Разнообразие радиоактивных минералов, принадлежащих к различным классам и группам, обусловлено нахождением урана в четырёх- и шестивалентных формах, изоморфизмом четырёхвалентного урана с Th и редкоземельными элементами.

Урановые минералы подразделяются на две группы. Одна объединяет минералы  $\text{U}^{4+}$  (всегда содержащие некоторое количество  $\text{U}^{6+}$ ), представленные окислом урана – уранинитом  $\text{UO}_2$  и его силикатом – коффинитом  $\text{U}(\text{SiO}_4)_{1-x}(\text{OH})_{4x}$ . Порошковатые окислы (урановые черни) и гидроокислы урана образуют скопления в зонах окисления различных урановых месторождений.

Вторая группа объединяет минералы, содержащие  $\text{U}^{6+}$ . Это гидроокислы (беккерелит  $3\text{UO}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ , кюриит  $2\text{PbO} \cdot 5\text{UO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ), силикаты (уранофан  $\text{Ca}(\text{H}_2\text{O})_2\text{U}_2\text{O}_4(\text{SiO}_4)_3\text{H}_2\text{O}$ , казолит  $\text{Pb}[\text{UO}_2][\text{SiO}_4]\text{H}_2\text{O}$ ), фосфаты (отенит  $\text{Ca}[\text{UO}_2]_2[\text{PO}_4]_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ , торбернит  $\text{Cu}[\text{UO}_2]_2[\text{PO}_4]_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ ), арсенаты (цейнерит  $\text{Cu}[\text{UO}_2]_2[\text{HSO}_4]_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ ), ванадаты (карнотит  $\text{K}_2[\text{UO}_2]_2[\text{VO}_4]_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ ), молибдаты (иригинит), сульфаты (уранопилит), карбонаты (ураноталит) – все они распространены в зонах окисления урановых месторождений. Ториевые минералы – окисел (ториаптит  $\text{ThO}_2$ ) и силикат (торит  $\text{ThSiO}_4$ ) – менее распространены в природе. Они встречаются в качестве акцессорных минералов в гранитах, сиенитах и пегматитах; иногда образуют существенные концентрации в различных россыпях. Уран и торийсодержащие минералы – титанаты (давидит), титанотанталниобаты (самарскит, колумбит, пирохлор), фосфаты (монацит), силикаты (циркон) – большей частью рассеяны в изверженных и осадочных горных породах, обуславливая их естественную радиоактивность. Лишь небольшая часть из них (давидит, монацит) образует существенные концентрации и является источником получения урана и тория.



Открытие радиоактивности оказало огромное влияние на развитие науки и техники. Оно ознаменовало начало эпохи интенсивного изучения свойств и структуры вещества. Новые перспективы, возникшие в энергетике, промышленности благодаря овладению ядерной энергией, были вызваны к жизни обнаружением способности химических элементов к самопроизвольным превращениям. За работы, связанные с исследованием и применением радиоактивности, было присуждено более 10 Нобелевских премий по физике и химии, в том числе А. Беккерелю, П. и М. Кюри, Э. Ферми, Э. Резерфорду, Ф. и И. Жолио-Кюри, Д. Хевеши, О. Гану, Э. Макмиллану и Г. Сиборгу, У. Либби.

## § 1.2. Энергия ядра атома

Работами Э. Резерфорда и упомянутых учёных было установлено наличие 3-х видов излучения радиоактивных элементов –  $\alpha$ -,  $\beta$ - и  $\gamma$ -лучей – и определена их природа.

*Эрнест Резерфорд (1871–1937) – знаменитый английский физик, основоположник ядерной физики, автор планетарной модели атома, член Лондонского королевского общества, директор Кавендишской лаборатории Кембриджского университета, член всех академий мира, лауреат Нобелевской премии (1908 г.), создатель глобальной научной школы. В лаборатории работали ученые многих стран мира.*

*«Резерфорд был тигром в работе», – говорил его ученик Марсден (вклейка 1, рис. 4).*

В январе 1899 г. Э. Резерфорд, изучая ионизацию газов урановыми лучами обнаружил неоднородность этого излучения: легко поглощаемую часть этого излучения, он назвал  $\alpha$ -лучами, менее поглощаемую  $\beta$ -лучами. Тогда же С. Мейер, Э. Швейдлер, Ф. Визель обнаружили способность радиоактивного излучения отклоняться в магнитном поле. В 1900 г. П. Вийяр во Франции открыл электромагнитное излучение радиоактивного происхождения – так называемые  $\gamma$ -лучи. В том же году Резерфорд обнаружил испускание газообразного радиоэлемента – эманацию тория. Описывая его свойства Резерфорд ввел понятие периода полураспада. Для процессов радиоактивного распада ядер (и элементарных частиц) характерен экспоненциальный закон уменьшения во време-

ни среднего числа активных ядер. Этот закон отражает независимость распада отдельного ядра от остальных ядер. Обычно продолжительность жизни радиоактивных ядер характеризуют периодом полураспада – промежутком времени  $T_{1/2}$ , на протяжении которого число радиоактивных ядер уменьшается в среднем вдвое. Поскольку продолжительность жизни отдельного ядра оказывается неопределённой, экспоненциальный закон распада выполняется лишь в среднем, причём тем точнее, чем больше полное число радиоактивных ядер. Основная единица радиоактивности – кюри, первоначально определялась как активность 1 г Ra. В дальнейшем под 1 кюри стали понимать активность радиоактивного препарата, в котором происходит  $3,7 \cdot 10^{10}$  распадов/с. Другая единица радиоактивности – резерфорд, равна 1/3700 кюри, что соответствует  $10^6$  распадов/с.

Э. Резерфорд и Ф. Содди рассмотрели фундаментальный вопрос об энергии радиоактивных превращений. Подсчитывая энергию испускаемых радиом  $\alpha$ -частиц они сделали вывод, что «энергия радиоактивных превращений по крайней мере в 20 000 раз, а может и в миллион раз превышает энергию любого молекулярного превращения... Энергия, скрытая в атоме, во много раз больше энергии освобождающейся при обычном химическом превращении». Выделяющаяся самопроизвольно энергия излучения радия была измерена калориметрическим методом П. Кюри и составила 100 (точнее 135) малых калорий на 1 г радия. «Непрерывное выделение такого количества тепла, – писал П. Кюри – не может быть объяснено обычным химическим превращением. Если искать причину образования тепла в каких-то внутренних превращениях, то эти превращения должны быть более сложной природы и должны быть вызваны какими-то изменениями самого атома радия». Таким образом, общий выход энергии в миллион раз превышает энергию, получаемую из равного по массе горючего или взрывчатого вещества.

В 1903 г. Э. Резерфорд и Ф. Содди выяснили, что испускание  $\alpha$ -лучей сопровождается превращением химических элементов, например превращением радия в радон. В 1913 г. К. Фаянс (Германия) и Ф. Содди независимо сформу-

лировали правило смещения, характеризующее перемещение изотопа в периодической системе элементов при различных радиоактивных превращениях. Ранее опыты Беккереля показали, что урановые соединения обладают большими запасами энергии, интенсивность излучения которой остается постоянной в течение долгих лет. Возникал вопрос о том, откуда эти вещества получают энергию. Множество экспериментов показали, что радиоактивность является свойством ядер атомов урана и других радиоактивных элементов.

Поэтому 1903 год следует считать в истории радиоактивности годом открытия радиоактивного превращения атомов и нового вида энергии – атомной энергии, возникающей при этих превращениях. На основании изучения теории и практики радиоактивных превращений Резерфорд пришел к выводу, что при распаде элементов происходит выделение колоссального количества энергии. Этот вывод был сделан Резерфордом в 1908 г., хотя он сам не верил вплоть до 1937 г. в возможность практического использования ядерной энергии в ближайшее время.

Пьер Кюри указал и на потенциальную опасность, которую представляют радиоактивные вещества. В своей Нобелевской лекции он говорил: «Можно себе представить и то, что в преступных руках радий способен быть очень опасным, и в связи с этим следует задать такой вопрос: является ли познание тайн природы выгодным для человечества, достаточно ли человечество созрело, чтобы извлекать из него только пользу, или же это познание для него вредно? В этом отношении очень характерен пример с открытиями Нобеля: мощные взрывчатые вещества дали возможность производить удивительные работы. Но они же оказываются страшным орудием разрушения в руках преступных политических деятелей, которые вовлекают народы в войны. Я лично принадлежу к людям, мыслящим как Нобель, а именно, что человечество извлечет из новых открытий больше блага, чем зла».

В 1910 г. Ф. Содди в книге «Радий и его разгадка» отвечает на вопрос, обладают ли нерадиоактивные элементы запасом энергии, подобно радиоактивным: «Этим внутренним запасом энергии, с которым мы впервые познакоми-

лись в связи с радием, в большей или меньшей степени обладают все элементы вообще, и этот запас энергии является особенностью их внутреннего строения». При превращении элементов происходит выделение энергии. И далее: «Мы едва ли можем сомневаться, что когда-нибудь сможем разрушать и создавать элементы, как теперь мы разрушаем и создаем химические соединения, мировой пульс забьется тогда с новой силой, также неизмеримо превосходящей все силы, как эти последние, в свою очередь, превосходят собой естественные ресурсы дикаря». Возможно, если бы не Первая мировая война, развитие ядерной техники началось бы раньше, чем это случилось реально. Это важно и по другой причине: в ядерном реакторе деления мы используем лишь доли процента полной энергии материи ( $E=mc^2$ ), в будущем термоядерном реакторе около 1%. Использование полной энергии(100%) возможно лишь в реакциях аннигиляции частиц и античастиц.

### **§ 1.3. Радиоактивные элементы в периодической системе**

После открытия радиоактивности было ясно, что радий, полоний, актиний генерируются в содержащих их минералах. В 1903 г. Э. Резерфорд и Ф. Содди сообщали об исследованиях радиоактивного распада тория: «Было приведено достаточно данных, чтобы ясно показать, что в радиоактивности тория и радиоактивности радия проявляются сложнейшие превращения, каждое из которых сопровождается непрерывным образованием особого вида активного вещества». Образующиеся из радия и тория эманации являются инертным газом, который, возможно, и есть конечный продукт распада. Впоследствии В. Рамзай и Ф. Содди обнаружили, что в состав продуктов распада радия входит гелий.

В 1908 г. Э. Резерфорд и Г. Гейгер измерили заряд альфа-частицы и показали, что она является дважды ионизированным атомом гелия. В новых статьях Э. Резерфорда и Ф. Содди со всей определенностью утверждается, что «все изучавшиеся случаи радиоактивного превращения сводятся к образованию одного вещества из другого. Когда происходит несколько превращений, то они происходят не одновременно, а последовательно. ...Благодаря тому, что каж-

дый последующий продукт распада превращается в новый элемент, они могут накапливаться только до того момента, когда скорость распада (пропорциональная накопленному количеству) уравнивает скорость образования (пропорционального количеству непосредственно материнского вещества).

Это условие называется «условием радиоактивного равновесия». Это условие описывает существование всех членов последовательного ряда радиоактивных элементов в количествах, пропорциональных их среднему времени жизни; при этих условиях одинаковое количество атомов всех продуктов этого ряда (независимо от общего количества вещества) расщепляются одновременно и испускают одинаковое число частиц в секунду.

Э. Резерфорд и Ф. Содди сформулировали закон радиоактивного превращения: «Во всех случаях, когда отделяли один из радиоактивных продуктов и исследовали его активность независимо от радиоактивности вещества, из которого он образовался, было обнаружено, что эта активность при всех исследованиях уменьшается со временем по закону геометрической прогрессии». Отсюда следует, что «скорость превращения все время пропорциональна количеству вещества, еще не подвергшегося превращению».

$$\frac{dN_t}{dt} = -\lambda N_t. \quad (1.1)$$

Относительное количество радиоактивного вещества  $dN_t / N_t$ , превращающегося в единицу времени, есть постоянная величина  $\lambda$ , которую Э. Резерфорд и Ф. Содди называли радиоактивной постоянной (сейчас – постоянная радиоактивного распада). Тогда же они объединили в первые цепочки 10 радиоактивных элементов. После открытия большого количества естественных радиоактивных элементов и формирования правила сдвига местоположения продукта распада в периодической системе Д. И. Менделеева относительно местоположения в ней материнского элемента в зависимости от природы испускаемых ими излучений стало ясно, что многие радиоэлементы претендуют на одно и то же место.

На рис. 1.1. представлены семейства урана-235, урана-238 и тория-232.

В 1913 г. Ф. Содди вводит понятие изотопии: атомы элемента данного порядкового атомного номера могут отличаться массой ядра, скоростью радиоактивного распада и природой излучений. В том же году Д. Томсон обнаружил, что элемент неон имеет атомы разной массы. Далее А. Ван ден Брук предположил, что порядковый номер элемента в периодической системе равен заряду ядра его атомов.

Эту идею экспериментально подтвердил Г. Мозли на примере цепочки элементов от кальция до никеля. Тем самым была решена задача о дробной величине массы элемента: элемент содержит атомы разной целочисленной массы в различных пропорциях.

Понятие изотопии позволило найти место в периодической системе всем вновь открытым радиоактивным элементам.

В дальнейшем все эти элементы естественного происхождения удалось связать в три семейства: урана ( $^{238}\text{U}$ ), тория ( $^{232}\text{Th}$ ), актиноурана ( $^{235}\text{U}$ ). Во многих случаях продукты радиоактивного распада сами оказываются радиоактивными, и тогда образованию стабильного изотопа предшествует цепочка из нескольких актов радиоактивного распада. Примерами таких цепочек являются радиоактивные ряды природных изотопов тяжёлых элементов, которые начинаются нуклидами  $^{238}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$  и заканчиваются стабильными изотопами свинца  $^{206}\text{Pb}$ ,  $^{207}\text{Pb}$ ,  $^{208}\text{Pb}$ . Многие радиоактивные изотопы могут распадаться по двум или нескольким из основных типов радиоактивности. В результате такой конкуренции разных путей распада возникают разветвления радиоактивных превращений. Для природных радиоактивных изотопов характерны разветвления, обусловленные возможностью  $\alpha$ - и  $\beta$ -распадов. Для изотопов трансурановых элементов наиболее распространены разветвления, связанные с конкуренцией  $\alpha$ - (реже  $\beta$ -) распадов и спонтанного деления. У нейтронодефицитных ядер зачастую наблюдается конкуренция  $\beta^+$ -распада и электронного захвата.

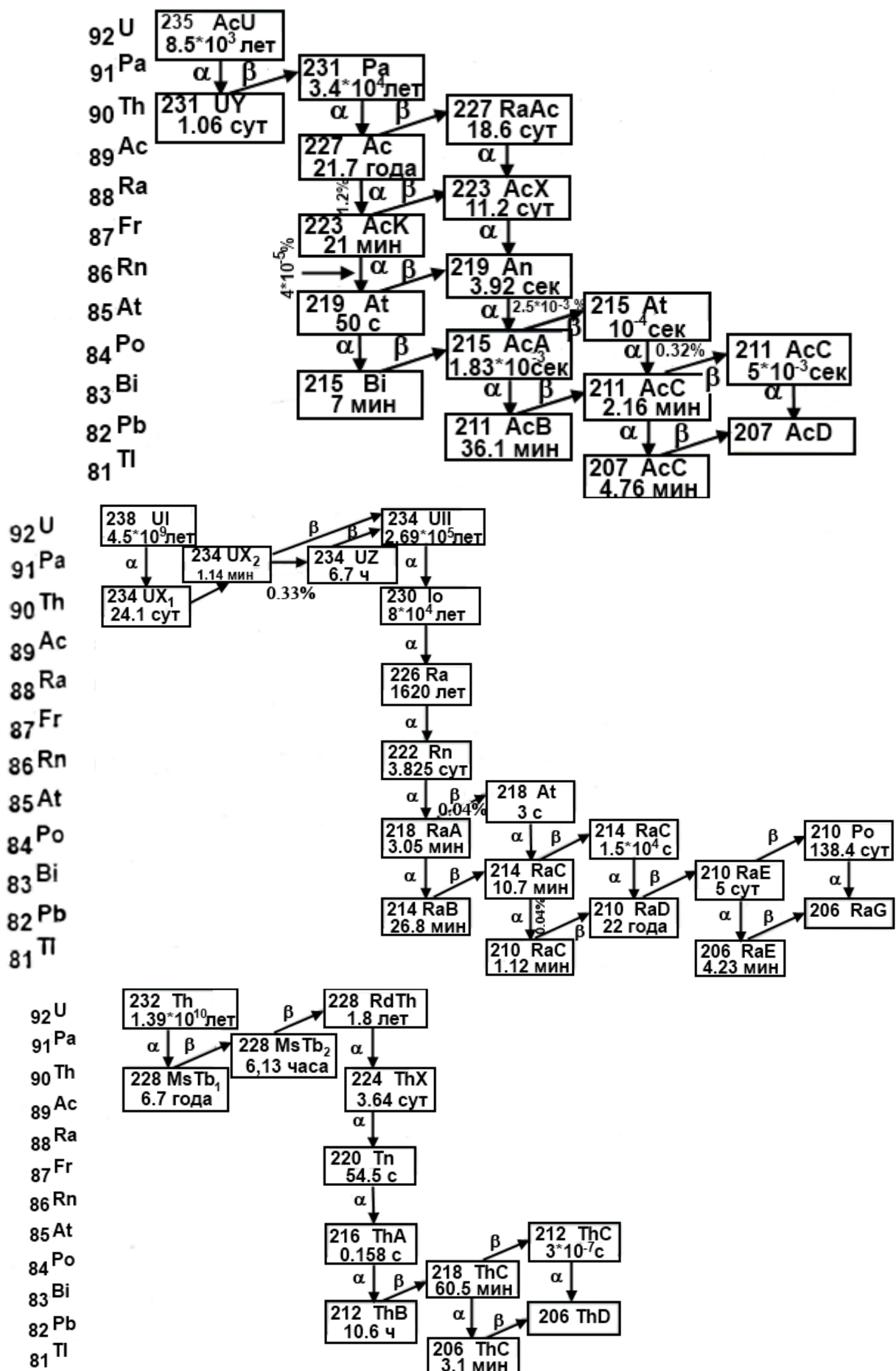


Рис. 1.1. Радиоактивные семейства урана-235, урана-238 и тория-232(сверху вниз)

Для многих изотопов с нечётными  $Z$  и чётными  $A$  оказываются энергетически возможными два противоположных варианта  $\beta$ -распада:  $\beta$ -распад и электронный захват или  $\beta^-$  и  $\beta^+$ -распады. Основная масса естественных радиоактивных изотопов ( $^7\text{Be}$ ,  $^{10}\text{Be}$ ,  $^{35}\text{S}$ ,  $^{32}\text{P}$ ,  $^{33}\text{P}$ ,  $^{22}\text{Na}$ ,  $^{14}\text{C}$ ,  $^3\text{H}$ ), возникающих при взаимодействии космического излучения с ядрами атомов хим. элементов, входящих в состав воздуха, образуется в стратосфере, где и отмечаются наибольшие их концентрации. Искусственные радиоактивные аэрозоли образуются при ядерных взрывах. Через несколько десятков секунд после взрыва они содержат  $\sim 100$  различных радиоактивных изотопов: наиболее токсичными из них считаются  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{14}\text{C}$ ,  $^{131}\text{I}$ . Высота заброса в атмосферу радиоактивных аэрозолей зависит от мощности и высоты ядерного взрыва, а характер их распространения – от размеров частиц и от высоты заброса их в атмосферу. Наиболее крупные частицы (сотни мкм и выше) быстро выпадают из атмосферы, распространяясь всего на сотни км от места взрыва (локальные выпадения).

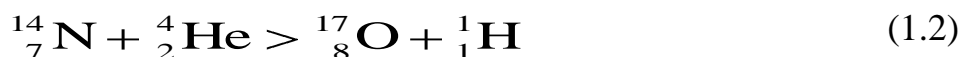
Радиоактивность горных пород, определяется содержанием в них радиоактивных элементов – членов радиоактивных рядов  $^{238}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$  и радиоактивного изотопа  $^{40}\text{K}$ . Содержание других радиоактивных изотопов ( $^{87}\text{Rb}$ ,  $^{150}\text{Nd}$  и других) существенно не влияет на общую радиоактивность горных пород, так как скорость их радиоактивного распада крайне мала. Среднее содержание в земной коре (до глубины 16 км) обоих изотопов урана составляет около  $2,5 \cdot 10^{-4}\%$  (вес.), тория  $1,3 \cdot 10^{-3}\%$ , радиоактивного изотопа калия 0,029%. Кроме того, в горных породах присутствуют продукты распада радиоактивных элементов, которые иногда мигрируют в окружающие породы и образуют в земной коре струи подземных газов ( $\text{He}$ ,  $\text{Ar}$  и т.д.). В почвах накапливается  $\text{Rn}$ , имеющий радиогенное происхождение. Содержание радиоактивных элементов в основном в верхней (гранитной) оболочке Земли связано с химическими особенностями силикатов (изоморфным вхождением  $\text{U}$  и  $\text{Th}$  в их структуру). Расплавление силикатных зон земной коры приводит к обогащению коры  $\text{U}$ ,  $\text{Th}$  и щелочными элементами.



#### § 1.4. Первые ядерные реакции. Открытие нейтрона

Радиоактивность, являясь свойством радиоактивных атомов, не зависит от их химических свойств и связи с другими атомами и не подвержена влиянию различных внешних факторов независимо от их количества и качества. Ионизирующее действие излучений радиоактивных атомов позволило установить природу излучений и тип частиц с помощью воздействия на излучения электрических и магнитных полей на основе созданной Томсоном и Резерфордом теории ионизации. При проведении различных экспериментов начинают использовать радиоактивные атомы как источники излучений. В основном это источники  $\alpha$ -частиц, испускаемых радием и полонием. Проблемой их использования была малая интенсивность излучения, так как количество радия и полония было небольшим и эти вещества находились в разных лабораториях.

В 1906 г. при изучении прохождения  $\alpha$ -частиц через тонкие слои материалов Э. Резерфорд установил, что они рассеиваются атомами этих материалов. Это было первым исследованием ядерного взаимодействия – упругого рассеяния. На основании этого эксперимента был сделан вывод о положительном заряде ядра атома. Аналогичные эксперименты были продолжены Гейгером с тонкими металлическими фольгами. В 1919 г. Э. Резерфорд подвергает облучению  $\alpha$ -частицами азот и обнаруживает его превращение в изотоп кислорода с массой 17 и атом водорода (т.е. протон – ион атома водорода):



Таким образом, впервые было осуществлено искусственное превращение элементов. Положительный заряд ядра атома создает вокруг себя сильный потенциал: ядро окружено потенциальным барьером. Для преодоления этого барьера изнутри или снаружи частица должна обладать определенной энергией. Энергия вылетающей из ядра атома  $\alpha$ -частицы при его радиоактивном распаде была измерена еще в начале XX века. Наиболее быстрые  $\alpha$ -частицы, испускаемые радиоактивными веществами, имеют энергию не более 8 МэВ. В 1925 г.

наиболее мощные индукционные катушки, используемые для получения рентгеновских лучей, давали разность потенциалов 100 кВ. Это означает, что ускоренный в поле такой катушки электрон или протон мог иметь энергию не выше 0,1 МэВ, т.е. намного меньше энергии  $\alpha$ -частиц. Сформулированная Г. А. Гамовым в 1928 г. теория туннелирования  $\alpha$ -частиц предсказывала, что протоны с энергией 1 МэВ будут иметь такую же эффективность, как  $\alpha$ -частицы с энергией 32 МэВ.

*Джордж Гамов (1904–1968) – американский физик, эмигрировавший в 1933 из СССР (Георгий Антонович Гамов), в 1928 дал ответ на вопрос: почему из ядра вылетают именно альфа-частицы, а не отдельные протоны?*

*Альфа-распаду подвержены, в основном, тяжелые ядра – их известно более 200. Количественная теория альфа-распада была создана лишь в 1980-х, в ее разработке принимали участие и отечественные физики, в их числе Лев Давидович Ландау (вклейка 1, рис. 5).*

Гамов в созданной им теории показал, что волновая природа частиц позволяет им преодолевать потенциальный барьер («туннельный эффект»). Теория предсказывает, что при одинаковой энергии бомбардирующих частиц вероятность проникнуть через потенциальный барьер ядра атома тем больше, чем меньше масса частицы.

В природе есть три наиболее ярких примера туннелирования:  $\alpha$ -распад, двухатомная молекула водорода и холодная эмиссия электронов из металла.

Альфа-лучи испускают, главным образом, ядра самых тяжелых и потому менее стабильных атомов (в периодической таблице они расположены после свинца). Это высокоэнергетичные частицы. Обычно наблюдается несколько групп  $\alpha$ -частиц, каждая из которых имеет строго определенную энергию. Так, почти все  $\alpha$ -частицы, вылетающие из ядер  $^{226}\text{Ra}$ , обладают энергией в 4,78 МэВ и небольшая доля  $\alpha$ -частиц – энергией в 4,60 МэВ. Другой изотоп радия –  $^{221}\text{Ra}$ , испускает четыре группы  $\alpha$ -частиц с энергиями 6,76, 6,67, 6,61 и 6,59 МэВ. Это свидетельствует о наличии в ядрах нескольких энергетических уровней, их раз-

ность соответствует энергии излучаемых ядром  $\gamma$ -квантов. Известны и «чистые» альфа-излучатели (например,  $^{222}\text{Rn}$ ).

По формуле  $E = mu^2/2$  можно подсчитать скорость  $\alpha$ -частиц с определенной энергией. Например, 1 моль  $\alpha$ -частиц с  $E = 4,78$  МэВ имеет  $E = 4,78 \cdot 10^6$  эВ = 96500 Дж/(эВ·моль) =  $4,61 \cdot 10^{11}$  Дж/моль и массу  $m = 0,004$  кг/моль, откуда  $u = 15200$  км/с. Альфа-частицы обладают самым сильным ионизирующим действием: сталкиваясь с любыми другими атомами в газе, жидкости или твердом теле, они «обдирают» с них электроны, создавая заряженные частицы. При этом  $\alpha$ -частицы очень быстро теряют энергию: они задерживаются даже листом бумаги. В воздухе  $\alpha$ -излучение радия проходит всего 3,3 см,  $\alpha$ -излучение тория – 2,6 см и т.д. В конечном счете потерявшая кинетическую энергию  $\alpha$ -частица захватывает два электрона и превращается в атом гелия. Первый потенциал ионизации атома гелия ( $\text{He} \rightarrow e + \text{He}^+$ ) составляет 24,6 эВ, второй ( $\text{He}^+ \rightarrow e + \text{He}^{+2}$ ) – 54,4 эВ, это намного больше, чем у любых других атомов. При захвате электронов  $\alpha$ -частицами выделяется огромная энергия (более 7600 кДж/моль), поэтому ни один атом, кроме атомов самого гелия, не в состоянии удержать свои электроны, если по соседству окажется  $\alpha$ -частица. В ядре протоны и нейтроны удерживаются вместе ядерными силами, поэтому было непонятно, каким образом альфа-частица, состоящая из двух протонов и двух нейтронов, может покинуть ядро. По законам квантовой механики  $\alpha$ -частицы, как и любые частицы малой массы, обладают волновой природой и потому у них есть некоторая небольшая вероятность оказаться вне ядра, на небольшом (примерно  $6 \cdot 10^{-12}$  см) расстоянии от него. Как только это происходит, на частицу начинает действовать кулоновское отталкивание от очень близко находящегося положительно заряженного ядра. Вылет из ядра  $\alpha$ -частицы приводит к ядру другого химического элемента, который смещен в периодической таблице на две клетки влево. В качестве примера можно привести превращения семи изотопов полония (заряд ядра 84) в разные изотопы свинца (заряд ядра 82):  $^{218}\text{Po} \rightarrow ^{214}\text{Pb}$ ,  $^{214}\text{Po} \rightarrow ^{210}\text{Pb}$ ,  $^{210}\text{Po} \rightarrow ^{206}\text{Pb}$ ,  $^{211}\text{Po} \rightarrow ^{207}\text{Pb}$ ,  $^{215}\text{Po} \rightarrow ^{211}\text{Pb}$ ,  $^{212}\text{Po} \rightarrow ^{208}\text{Pb}$ ,

$^{216}\text{Po} \rightarrow ^{212}\text{Pb}$ . Изотопы свинца  $^{206}\text{Pb}$ ,  $^{207}\text{Pb}$  и  $^{208}\text{Pb}$  стабильны, остальные радиоактивны.

**Бета-распад.** Бета-распад наблюдается как у тяжелых, так и у легких ядер, например, у трития. Эти легкие частицы (быстрые электроны) обладают более высокой проникающей способностью. Так, в воздухе  $\beta$ -частицы могут пролететь несколько десятков сантиметров, в жидких и твердых веществах – от долей миллиметра до примерно 1 см. В отличие от  $\alpha$ -частиц, энергетический спектр  $\beta$ -лучей не дискретный. Энергия вылетающих из ядра электронов может меняться почти от нуля до некоторого максимального значения, характерного для данного радионуклида. Обычно средняя энергия  $\beta$ -частиц намного меньше, чем у  $\alpha$ -частиц; например, энергия  $\beta$ -излучения  $^{228}\text{Ra}$  составляет 0,04 МэВ. Но бывают и исключения; так  $\beta$ -излучение короткоживущего нуклида  $^{11}\text{Be}$  несет энергию 11,5 МэВ. Долго было неясно, каким образом из одинаковых атомов одного и того же элемента вылетают частицы с разной скоростью. Когда же стало известно и понятно строение атома и атомного ядра, появилась новая загадка: откуда вообще берутся вылетающие из ядра  $\beta$ -частицы – ведь в ядре никаких электронов нет. После того как в 1932 английский физик Джеймс Чедвиком открыл нейтрон, отечественные физики Дмитрий Дмитриевич Иваненко (1904–1994) и Игорь Евгеньевич Тамм и независимо немецкий физик Вернер Гейзенберг предположили, что атомные ядра состоят из протонов и нейтронов. В таком случае  $\beta$ -частицы должны образоваться в результате внутриядерного процесса превращения нейтрона в протон и электрон:  $n = p + e$ . Масса нейтрона немного превышает суммарную массу протона и электрона, избыток массы, в соответствии с формулой Эйнштейна  $E = mc^2$ , дает кинетическую энергию вылетающего из ядра электрона, поэтому  $\beta$ -распад наблюдается, в основном, у ядер с избыточным числом нейтронов. Например, нуклид  $^{226}\text{Ra}$  –  $\alpha$ -излучатель, а все более тяжелые изотопы радия ( $^{227}\text{Ra}$ ,  $^{228}\text{Ra}$ ,  $^{229}\text{Ra}$  и  $^{230}\text{Ra}$ ) –  $\beta$ -излучатели. Оставалось выяснить, почему  $\beta$ -частицы, в отличие от  $\alpha$ -частиц, имеют сплошной спектр энергии, это означало, что одни из них обладают очень малой энергией, а другие – очень большой (и при этом движутся со скоростью, близкую к

скорости света). Более того, суммарная энергия всех этих электронов (она была измерена с помощью калориметра) оказалась меньше, чем разность энергии исходного ядра и продукта его распада. Снова физики столкнулись с «нарушением» закона сохранения энергии: часть энергии исходного ядра непонятно куда исчезала. Незыблемый физический закон «спас» в 1931 г. швейцарский физик Вольфганг Паули, который предположил, что при  $\beta$ -распаде из ядра вылетают две частицы: электрон и гипотетическая нейтральная частица – нейтрино с почти нулевой массой, которая и уносит избыток энергии. Непрерывный спектр  $\beta$ -излучения объясняется распределением энергии между электронами и этой частицей. Нейтрино (как потом оказалось, при  $\beta$ -распаде образуется так называемое электронное антинейтрино  $\bar{\nu}$ ) очень слабо взаимодействует с веществом (например, легко пронзает по диаметру земной шар и даже огромную звезду) и поэтому долго не обнаруживалось – экспериментально свободные нейтрино были зарегистрированы только в 1956 г. Таким образом, уточненная схема бета-распада такова:  $n \rightarrow p + \bar{\nu}$ . Количественную теорию  $\beta$ -распада на основе представлений Паули о нейтрино разработал в 1933 г. итальянский физик Энрико Ферми, он же предложил название нейтрино (по-итальянски «нейтрончик»). Превращение нейтрона в протон при  $\beta$ -распаде практически не изменяет массу нуклида, но увеличивает заряд ядра на единицу. Следовательно, образуется новый элемент, смещенный в периодической таблице на одну клетку вправо, например:  ${}_{92}^{239}\text{U} \rightarrow {}_{93}^{239}\text{Np}$ ,  ${}_{93}^{239}\text{Np} \rightarrow {}_{94}^{239}\text{Pu}$ ,  ${}_{2}^{6}\text{He} \rightarrow {}_{3}^{6}\text{Li}$  и т.д. (одновременно из ядра вылетают электрон и антинейтрино). Помимо альфа- и бета-распадов, известны и другие типы самопроизвольных радиоактивных превращений. В 1938 г. американский физик Л. Альварес открыл третий тип радиоактивного превращения – электронный захват (К-захват). В этом случае ядро захватывает электрон с ближайшей к нему энергетической оболочки (К-оболочки). При взаимодействии электрона с протоном образуется нейтрон, а из ядра вылетает нейтрино, уносящее избыток энергии. Превращение протона в нейтрон не изменяет массу нуклида, но уменьшает заряд ядра на единицу. Следовательно, образуется новый элемент, находящийся в периодической таблице на одну клетку левее.

Открытия в области радиоактивности продолжались в течение всего XX века. В 1934 г. дочь Марии Кюри Ирэн Жолио-Кюри и ее муж Фредерик Жолио-Кюри открыли позитронный распад. В этом процессе один из протонов ядра превращается в нейтрон и антиэлектрон (позитрон) – частицу с той же массой, но положительно заряженную; одновременно из ядра вылетает нейтрино:  $p \rightarrow n + e^+ + \bar{\nu}_e$ . Масса ядра при этом не изменяется, а смещение происходит, в отличие от  $\beta^-$ -распада, влево,  $\beta^+$ -распад характерен для ядер с избытком протонов (так называемые нейтронно – дефицитные ядра). Так, тяжелые изотопы кислорода  $^{19}\text{O}$ ,  $^{20}\text{O}$  и  $^{21}\text{O}$   $\beta^-$ -активны, а его легкие изотопы  $^{14}\text{O}$  и  $^{15}\text{O}$   $\beta^+$ -активны, например:  $^{14}\text{O} \rightarrow ^{14}\text{N} + e^+ + \bar{\nu}_e$ . Как античастицы, позитроны сразу же уничтожаются (аннигилируют) при встрече с электронами с образованием двух  $\gamma$ -квантов. Позитронный распад часто конкурирует с К-захватом. В 1938 г. немецкий физик и химик Отто Ган, австрийский радиохимик и физик Лизе Мейтнер (в ее честь назван элемент Mt – мейтнерий) и немецкий физикохимик Фриц Штрассман (1902–1980) обнаружили, что при бомбардировке нейтронами ядра урана делятся на осколки, причем вылетевшие из ядер нейтроны способны вызвать деление соседних ядер урана, что приводит к цепной реакции). Этот процесс сопровождается выделением огромной (по сравнению с химическими реакциями) энергии, что привело к созданию ядерного оружия и строительству АЭС. В 1940 Георгий Николаевич Флеров (1913–1990) и Константин Антонович Петржак (1907–1998) на примере урана открыли самопроизвольное (спонтанное) деление, при котором нестабильное ядро распадается на два более легких ядра, массы которых различаются не очень сильно, например:  $^{238}_{92}\text{U} \rightarrow ^{144}_{56}\text{Ba} + ^{92}_{36}\text{Kr} + 2n$ . Этот тип распада наблюдается только у урана и более тяжелых элементов – всего более чем у 50 нуклидов. В случае урана спонтанное деление происходит очень медленно: среднее время жизни атома  $^{238}\text{U}$  составляет 6,5 миллиарда лет.

В 1982 была открыта протонная радиоактивность: испускание ядром протона (это возможно лишь для некоторых искусственно полученных ядер, обладающих избыточной энергией). В 1960 физико-химик Виталий Иосифович

Гольданский (1923–2001) теоретически предсказал двухпротонную радиоактивность: выбрасывание ядром двух протонов со спаренными спинами. Впервые она наблюдалась в 1970. Очень редко наблюдается и двухнейтронная радиоактивность (обнаружена в 1979).

В 1984 была открыта кластерная радиоактивность (от англ. cluster – гроздь, рой). При этом, в отличие от спонтанного деления, ядро распадается на осколки с сильно отличающимися массами, например, из тяжелого ядра вылетают ядра с массами от 14 до 34. Кластерный распад также наблюдается очень редко, и это в течение длительного времени затрудняло его обнаружение. Некоторые ядра способны распадаться по разным направлениям. Например,  $^{221}\text{Rn}$  на 80% распадается с испусканием  $\beta$ -частиц и на 20% –  $\alpha$ -частиц, многие изотопы редкоземельных элементов ( $^{137}\text{Pr}$ ,  $^{141}\text{Nd}$ ,  $^{141}\text{Pm}$ ,  $^{142}\text{Sm}$  и др.) распадаются либо путем электронного захвата, либо с испусканием позитрона. Различные виды радиоактивных излучений часто (но не всегда) сопровождаются  $\gamma$ -излучением. Происходит это потому, что образующееся ядро может обладать избыточной энергией, от которой оно освобождается путем испускания гамма-квантов. Энергия  $\gamma$ -излучения лежит в широких пределах.

Физику атомного ядра в СССР одним из первых с 1932 года стал изучать И. В. Курчатов. Сейчас, даже трудно представить, в какой непростой общественной атмосфере приходилось тогда ему работать. Многие ученые в Ленинградском физико-техническом институте, сотрудником которого был Курчатов, считали исследования в области ядерной физики слишком отвлеченными, оторванными от жизни, настаивали, что этими исследованиями заниматься не стоит, так как ядерная физика очень далека от практического применения. Курчатов же был в числе тех, кто уже тогда понимал перспективу использования ядерной энергии. Об этом, в частности, говорят его письма предвоенных лет в Академию наук СССР и в правительство.

**Игорь Васильевич Курчатов (1903–1960)** – выдающийся советский ученый, академик АН СССР, трижды Герой Социалистического Труда, основатель и первый директор Института атомной энергии. Он прожил короткую, но необыкновенно яркую жизнь. Под его руководством созданы первый в Европе ядерный реактор (1946), первая в

*СССР атомная бомба (1949), первая в мире термоядерная бомба (1953), построена первая в мире атомная электростанция (1954). В конце жизни Игорь Васильевич вспоминал: «В начале 30-х годов мне довелось быть у истоков зарождавшейся атомной физики в Украине. В то время я часто приезжал в молодой физико-технический институт, созданный в Харькове по решению правительства в октябре 1928 года, и работал в нем со своими старыми друзьями: К. Д. Синельниковым, А. К. Вальтером и А. И. Лейпунским, вместе с которыми начинал свою научную деятельность в Ленинграде» (вклейка 1, рис. 6).*

По инициативе А. Иоффе в 1929 г. были основаны два новых физико-технических института – в Харькове и Казани. Эти города были выбраны не случайно: именно в них одновременно в 1805 г. были основаны Императорские университеты (вторые после Московского университета), именно в них наибольшее развитие получила тяжелая, в том числе электротехническая промышленность. Так, Харьков в годы СССР являлся третьим по величине после Москвы и Ленинграда машиностроительным центром. Торжественное открытие в Харькове Украинского физико-технического института (сейчас Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт») состоялось 7 ноября 1930 года (вклейка 1, рис. 7).

Первых 23 научных сотрудника в Харьков направил Ленинградский физико-технический институт. Планировалось развивать исследования, требующие создания высоковольтных источников энергии для испытания изоляторов и создания мощных рентгеновских установок. Однако А. Лейпунский настоял на том, чтобы уже на стадии становления институт частично был сориентирован на развитие ядерных физических исследований, так как считал, что будущее ядерной физики будет определяться развитием техники высоких напряжений. Кроме того, К. Синельников, прибывший в Харьков 2 июня 1930 года, до этого два года работал в Кавендишской лаборатории у Э. Резерфорда, где проводилась подготовка к исследованию ядерных реакций, вызываемых протонами, ускоренными с помощью электрических полей высокого напряжения. В начале 1931 года институт посетил сотрудник и ученик Резерфорда Кокрофт, а в августе 1931 года – известный физик-теоретик Гамов. Это позволяет считать, что ядерная тематика исследований пришла в Украину непосредственно от Резерфорда из Кембриджа



– колыбели ядерной физики. Достигнутые успехи поспособствовали принятию решения о сооружении в УФТИ экспериментального генератора Ван де Граафа напряжением 7 млн вольт. В результате этого УФТИ занял ведущие позиции в области ядерной физики в СССР.

Для ускорения протонов необходимо было увеличить достигнутые напряжения в 5–7 раз. Теория Гамова дала стимул для получения искусственно ускоренных частиц. В этой области работали многие ученые, но наилучших результатов достигли Ван дер Грааф, Кокрофт и Уолтон. В 1932 г. в Кавендишской лаборатории создали установку на 700 кВ. Это напряжение было приложено к ускоряющей трубке и получен ток протонов в 100 мкА ( $\approx 10^{15}$  протонов/с) с энергией 0,7 МэВ. В том же 1932 г. Лоуренс в США создал циклотрон, позволивший получить протоны с энергией 1,25 МэВ. В мае 1932 г. Кокрофт и Уолтон в Кавендишской лаборатории и в октябре 1932 г. Синельников, Вальтер, Лейпунский и Латышев в Харькове в Украинском физико-техническом институте (УФТИ) на электростатическом ускорителе типа генератора Ван дер Граафа подвергли бомбардировке литий и расщепили его ядро на две  $\alpha$ -частицы:



Было установлено, что  $\alpha$ -частицы в процессе расщепления ядра лития выпускаются с энергией 8,76 МэВ. Возник вопрос о происхождении этой энергии, так как энергия протона составляет всего 1/7 часть энергии  $\alpha$ -частицы. Однако если сложить массу ядра лития с массой протона, то полученная сумма будет превышать массу двух  $\alpha$ -частиц. Возникает так называемый дефект массы: если бы можно было расщепить 7 г лития, то исчезло бы чуть более 18 мг, это количество перешло бы в энергию  $\alpha$ -частиц. Таим образом, этот эксперимент был не только примером искусственного превращения элементов, но и первым экспериментальным доказательством превращения вещества в энергию. После облучения лития Кокрофт и Уолтон облучали протонами бериллий, бор, углерод, кислород, кальций, железо, никель, медь, свинец, уран и наблюдали превраще-

ния этих элементов. По образному выражению Э. Резерфорда, возникла современная алхимия.

Так как было известно, что результирующий заряд ядра гелия равен двум единицам и А. Зоммерфельд считал, что  $\alpha$ -частица должна обладать устойчивой структурой, чтобы разрушить ядро атома азота в опыте Резерфорда. Для этого надо было определить строение ядра гелия и доказать существование протона, которое было сделано П. М. С. Блэккетом в 1925 г., а затем и нейтрона. О существовании ядра с массой, равной единице и зарядом равным нулю еще в 1920 г. в своей бэйкеровской лекции говорил Э. Резерфорд.

Блэккету удалось получить в камере Вильсона фотографии протона, вылетающего в результате столкновения  $\alpha$ -частицы с ядром азота. Во всех этих столкновениях  $\alpha$ -частица, по-видимому, поглощалась атомом, с которым она сталкивалась, поскольку ее следа после соударения не обнаруживалось. Это позволило Э. Резерфорду в том же 1926 г. дать этому следующее объяснение: ядро азота захватывает  $\alpha$ -частицу и испускает протон. Повторение этих экспериментов в разных вариантах многими исследователями (Позе, Мейтнер, Боте, де Бройль, Ренге) неопровержимо доказало что протон испускается ядром, подвергнувшимся соударению с  $\alpha$ -частицами в процессе его расщепления. События, которые привели к открытию нейтрона, начали разворачиваться в Берлине, где в 1930 г. В. Боте и Г. Беккер обнаружили сильно проникающее излучение при бомбардировке бериллия  $\alpha$ -частицами. Первое указание на существование нейтрона появилось в работе Г. Вебстера, в которой сообщалось о возникновении  $\gamma$ -излучения при облучении бериллия  $\alpha$ -частицами полония, причем излучение из мишени в направлении падения  $\alpha$ -частиц было более проникающим, чем в обратном направлении. Это можно было легко объяснить предположив, что излучение состоит из нейтральных частиц. В том же году И. и Ф. Жолио-Кюри опубликовали сообщение о способности излучения бериллия выбивать протоны из водородосодержащих веществ. Наконец в 1932 г. Чедвик получил достаточное количество полония для источника  $\alpha$ -частиц, чтобы уверенно провести эксперимент и обнаружить новую частицу – нейтрон по ядерной реакции:



Определение массы нейтрона подтвердило гипотезу Резерфорда.

### § 1.5. Искусственная радиоактивность

В 1934 супругами И. Жолио-Кюри и Ф. Жолио-Кюри была открыта искусственная радиоактивность, которая впоследствии приобрела особенно важное значение.

Из общего числа (около 2000) известных ныне радиоактивных изотопов лишь около 300 природные, а остальные получены искусственно, в результате ядерных реакций. Между искусственной и естественной радиоактивностью нет принципиального различия. Ирен Жолио-Кюри и Фредерик Жолио-Кюри обнаружили, что некоторые легкие элементы – бор, магний, алюминий – при бомбардировке их  $\alpha$ -частицами полония испускают позитроны.

*Фредерик Жолио-Кюри (1900–1958), Ирен Жолио-Кюри (1897–1956). Фредерик Жолио окончил Парижскую школу физики, где когда-то преподавал Пьер Кюри. После армии по рекомендации Поля Ланжевена поступил в Институт радия к Марии Кюри. Здесь он познакомился со своей будущей женой Ирен, дочерью Пьера и Марии Кюри. В военные годы Фредерик и Ирен Жолио-Кюри были активными участниками движения сопротивления, а в послевоенные годы – активными борцами за мир. Под руководством Ф. Жолио-Кюри 15 декабря 1948 г. был запущен первый французский ядерный реактор. До 1950 г. Ф. Жолио-Кюри занимал пост Верховного комиссара по атомной энергии Франции (вклейка 1, рис. 8).*

Эмиссия начиналась не сразу после сближения источника и поглотителя, а увеличивалась постепенно по мере облучения и достигала некоторой предельной величины. После удаления источника  $\alpha$ -частиц эмиссия позитронов не прекращалась, а начинала спадать экспоненциально со временем как это происходит с активностью радиоактивного вещества. Период полураспада составил для бора 14 мин, для алюминия – 3 мин 15 с, для магния – 2,5 мин. Выделив из облучаемого вещества радиоактивные продукты, супруги Жолио-Кюри исследо-

вали их химическую природу. Наблюдаемое явление было объяснено тем, что под влиянием бомбардировки ядер легких элементов  $\alpha$ -частицами вначале образуются новые искусственные ядра, которые затем распадаются с испусканием позитрона.

В случае алюминия процесс протекает в два этапа (вклейка 1, рис. 9). На первом этапе образуется радиофосфор:



Радиофосфор распадается с образованием стабильного изотопа  ${}_{14}^{30}\text{Si}$ :



Аналогичные процессы происходят при облучении  $\alpha$ -частицами ядер бора и магния с образованием в первом случае радиоазота, а во втором – радиокремния (вклейка 1, рис. 10).

Результаты, полученные И. и Ф. Жолио-Кюри, открыли новую обширную область для исследований.

Эти эксперименты показали путь превращения стабильных элементов в радиоактивные изотопы, излучающие энергию. В течение нескольких месяцев были получены более пятидесяти новых радиоактивных элементов, дополнительно к тем тридцати, которые существуют в земной коре.

Ф. Жолио-Кюри предсказал процессы, способные привести к выделению громадных запасов атомной энергии. 12 декабря 1935 г. в своем выступлении при вручении ему Нобелевской премии он сказал: «Если заглянем в прошлое и охватим взглядом прогресс науки, который продолжается все более и более нарастающими темпами, мы получим право думать, что исследователи, которые создают или разрушают элементы по своему желанию, сумеют добиться превращений, имеющих характер взрыва, добиться настоящих цепных реакций. Если мы

сможем осуществить подобные превращения, то удастся высвободить огромное количество энергии, которую можно будет использовать. Если цепная реакция распространится на все элементы нашей планеты, мы должны предвидеть последствия подобного катаклизма. Астрономы иногда отмечают, что яркость какой-нибудь звезды незначительной величины внезапно возрастает, что звезда, ранее невидимая невооруженным глазом, вдруг начинает ярко сверкать на небе, такое появление новой звезды, такое внезапное увеличение ее энергии является, возможно, следствием превращений, имеющих характер взрыва. Исследователи, бесспорно, попытаются воспроизвести этот процесс, приняв, мы надеемся, необходимые меры предосторожности».

До открытия Отто Ганом и Фрицем Штрассманом искусственного распада (деления) урана оставалось три года.

### **§ 1.6. Нейтрон в действии. Деление урана. Плутоний**

До сих пор ядерными снарядами для превращения элементов служили заряженные частицы  $\alpha$ -частицы и протоны. После открытия нейтрона и установления строения атомных ядер стало ясно, что нейтроны могут проникнуть в ядро атома значительно легче, так как они не имеют заряда, а их масса сосредоточена в значительно меньшем объеме, чем в протоне. Поглощение нейтронов веществом происходит при соударении нейтронов с ядрами атомов материала поглотителя, поэтому оно очень мало и одинаково во всех направлениях.

В 1932 г. Н. Фезер, бомбардируя азот излучением бериллий-полониевого источника, обнаружил с помощью камеры Вильсона расщепление ядра азота. Ему удалось различить два разных процесса расщепления: один сопровождался захватом бомбардирующего нейтрона, другой протекал без захвата. В этом же году Лиза Мейтнер и К. Филипп добились расщепления ядра атома кислорода нейтронами.

*Лиза Мейтнер (1878–1968) – известный австрийский физик. После окончания Венского университета (1906 г.) с 1907 года начала свою научную деятельность в лаборатории Отто Гана в Берлине. Делом жизни Л. Мейтнер стали исследования радиоактивности и получение радиоактивных химических элементов. В 1939 году (совместно с О. Фришем) дала теоретическое объяснение опытов Гана и Штрассмана. Мейтнер объяснила наблю-*

*даемое явление как новый тип расщепления атома – деление ядра урана на два осколка, введя тем самым термин «деление» в ядерную физику, и предсказала существование цепной ядерной реакции деления (вклейка 1, рис. 11).*

Нейтроны оказались особенно эффективным средством для расщепления атомов. «Большая эффективность в получении ядерных реакций, – говорит Чедвик в своей Нобелевской лекции в 1935 г., – легко объясняется. При столкновении заряженной частицы с ядром атома вероятность ее проникновения в ядро ограничена кулоновской силой взаимодействия частицы с ядром, что определяет минимальное расстояние, на которое может приблизиться частица и которое возрастает с ростом атомного номера ядра и вскоре становится столь большим, что вероятность проникновения частицы в ядро становится очень малой. В случае соударения нейтрона с ядром ограничения такого типа не существует. Сила взаимодействия нейтрона с ядром очень мала, только на очень малых расстояниях она начинает быстро расти и носит характер притяжения. Вместо потенциального барьера, как в случае заряженных частиц, нейтрон встречает «потенциальную яму». Поэтому нейтроны даже очень малой энергии могут проникнуть в ядро».

Открытие нейтрона привело к современному представлению о строении атомного ядра из протонов и нейтронов. Эту гипотезу предложил Д. Д. Иваненко, а В. Гейзенберг создал теорию устойчивости атомного ядра и законы радиоактивного распада. После принятия этой теории строения ядра сразу определилось число нейтронов и протонов в ядре: число нейтронов примерно равно числу протонов; исключение составляют ядра тяжелых элементов, в которых избыточное число нейтронов. Проблема ядерных сил, обеспечивающих устойчивость таких ядер, не решена до сих пор. В марте 1934 г. вскоре после публикаций Ирен и Фредерика Жолио-Кюри об искусственной радиоактивности Энрико Ферми в Риме решил провести аналогичные эксперименты, используя в качестве бомбардирующих частиц нейтроны и применяя для этого бериллий – полониевый источник.

*Энрико Ферми (1901–1954) – выдающийся итальянский физик, занимавшийся теоретической и экспериментальной физикой, астрономией, атомной физикой, лауреат Нобелевской премии. После окончания в 1922 году Пизанского университета учился в Германии и Нидерландах. В 1926–1938 гг. – профессор Римского университета, после эмиграции в 1938 г. из фашистской Италии в*

*1939-1945 гг. – профессор Колумбийского университета, руководил исследовательскими работами в США в области использования ядерной энергии, а с 1946 года – профессор Чикагского университета. «Если можно говорить о призвании, то, без сомнения, Ферми рожден физиком», – писал о нем известный ученый Б. Понтекорво. (Вклейка 1, рис. 12)*

Методика проводимых Э. Ферми экспериментов была простой. Источник нейтронов в виде цилиндрической ампулы, содержащей порошок бериллия и эманацию радия, помещался внутрь цилиндрических образцов из исследуемых веществ. После облучения в течение некоторого времени образец переносился к счетчику Гейгера-Мюллера, регистрирующему излучение. Таким способом было изучено взаимодействие нейтронов с фтором, алюминием, кремнием, фосфором, хлором, железом, кобальтом, серебром, йодом. Все эти элементы активировались.

Результаты этих исследований и их интерпретация были изложены в письме в журнал «Ricerca scientifica» от 25 марта 1934 г., опубликованном под названием «Радиоактивность, наведенная нейтронной бомбардировкой».

Для дальнейшего развития исследований Э. Ферми привлекает молодых ученых Э. Амальди, Э. Сегре, О. Д'Агостино, Ф. Розетта, Б. Понтекорво. Интенсивному облучению нейтронами были подвергнуты 63 элемента, для 37 из них надежно установлено явление искусственной радиоактивности. В процессе этих исследований было обнаружено, что размещение образца с источником внутри парафинового блока увеличивает скорость активации образцов иногда в 100 раз. Это явление было неожиданным для всех.

Вскоре Э. Ферми установил, что вещество, содержащее водород, значительно сильнее замедляет нейтроны, чем другие вещества, не содержащие его. Это объяснялось тем, что массы нейтрона и протона практически одинаковы и при каждом соударении их кинетическая энергия перераспределяется почти поровну. Ферми легко показал, что нейтрон с энергией 1 МэВ после 20 соударений с атомами водорода теряет свою энергию почти до уровня, соответствующего тепловому возбуждению. Отсюда следует, что, проходя слой вещества, богатого водородом, нейтроны быстро теряют свою энергию, превращаясь в медленные ней-

троны, скорость которых определяется тепловым возбуждением, т.е. температурой замедлителя.

К декабрю 1934 г. исследования замедления нейтронов различными веществами были завершены. Они показали, что замедление нейтронов влияет на процесс их радиационного захвата. Попутно был обнаружен эффект неупругого столкновения нейтронов с атомными ядрами. Эффект замедления нейтронов водородосодержащими веществами (парафин, вода и т.д.) был запатентован в 1935 г. В связи с этим группа Ферми приступила к систематическому изучению поглощения и диффузии нейтронов различных энергетических групп. Обнаружилось, что нейтроны, сильно поглощаемые кадмием (т.е. тепловые нейтроны), по своим свойствам резко отличаются от нейтронов, проходящих через фильтр из кадмия: их альбеда (коэффициент отражения) было равно 0,83 и ничтожно для остальных нейтронов. Длина диффузии этих нейтронов в парафине составляла 3 см, для нейтронов остальных энергий она была в 6 раз меньше. Длина диффузии нейтронов выводилась из диффузионного уравнения с учетом утечки нейтронов из замедлителя. Было установлено, что нейтроны высоких энергий при замедлении трансформируются в тепловые нейтроны, имеющие, как выяснилось с помощью селектора скоростей, максвелловское распределение. Эта работа была проведена в 1935 г. Хальбаном и Прайсверком (США).

Облучение элементов медленными нейтронами превзошло все ожидания: почти во всех случаях образовывались радиоактивные изотопы. Как показали эксперименты, наибольший эффект возникает при вполне определенной энергии нейтронов, различной для разных веществ. Нильс Бор объяснил это явление наличием резонанса в этой области энергии нейтронов.

В 1935 г. были опубликованы результаты экспериментов Бьерга и Весткотта, а также Муна и Тилмана, которые свидетельствовали, что поглощение медленных нейтронов различными элементами происходит неодинаково и зависит от их природы. Существовавшая тогда теория захвата нейтронов атомными ядрами не объясняла этого факта, считая сечение (вероятность) поглощения обратно пропорциональным скорости нейтрона. Предполагалось, что эта энергетическая зависи-



мость справедлива в широком диапазоне энергий, включая и медленные нейтроны. Шагом вперед в разрешении этой проблемы была публикация статей Брейта и Вигнера в журнале «Physical Review» и Бора в журнале «Nature» в 1936 г. Авторы предположили, что нейтрон, проникнув в атомное ядро, может отдать часть своей энергии одному из ядерных компонентов и привести ядро в возбужденное метастабильное состояние, среднее время жизни которого достаточно для создания энергетического уровня с малой шириной. Они получили формулу сечения радиационного захвата, справедливую, когда нейтрон захватывается одним единственным резонансным уровнем. Эта формула называется одноуровневой формулой Брейта-Вигнера.

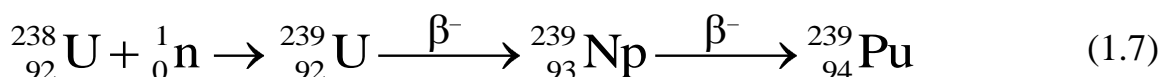
Бор развил новую концепцию ядерных процессов, согласно которой всякий ядерный процесс проходит через два независимых этапа: образования возбужденного промежуточного ядра вследствие захвата нейтрона и распада промежуточного ядра с испусканием частиц или фотонов.

Полученных результатов было вполне достаточно, чтобы приступить к систематической классификации ядерных реакций, вызываемых нейтронами. Было установлено, что все элементы независимо от их атомного веса могут быть активированы нейтронами. В результате ядерной реакции образуется элемент, который иногда оказывается изотопом облучаемого ядра-мишени, в других случаях его атомный номер на одну или две единицы меньше. С этой точки зрения было выявлено заметное различие в поведении легких и тяжелых элементов: атомный номер радиоактивных продуктов легких элементов обычно меньше атомного номера ядра-мишени, а радиоактивные продукты тяжелых элементов всегда оказываются изотопами облучаемых нейтронами ядер. В общем результаты, полученные при исследовании легких элементов, можно объяснить протеканием реакций  $(n, p)$  и  $(n, \alpha)$ , при которых заряд ядра-мишени уменьшается соответственно на одну или две единицы из-за вылета протона и  $\alpha$ -частицы. В этих процессах вылетающей частице приходится преодолевать электростатический потенциальный барьер, а он тем выше, чем тяжелее остаточное ядро. Это соображение, справедливое для любой бомбардирующей частицы, объясняет, почему супруги

Жолио-Кюри могли наблюдать искусственную радиоактивность только у легких атомных ядер. Объяснение ядерных реакций, в которых атомный номер полученных элементов остается прежним, столкнулось с затруднениями, решение которых потребовало некоторого времени.

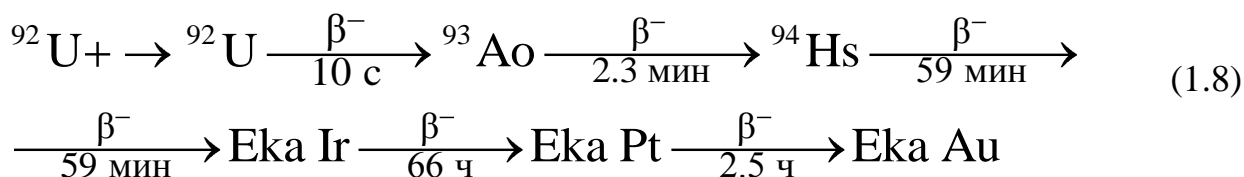
Продолжая эксперименты с элементами возрастающего атомного номера в первой половине 1934 г., в группе Э. Ферми облучили уран нейтронами.

Ожидая получить следующие за ураном элементы в периодической системе (трансурановые элементы), Ферми неожиданно обнаружил четыре носителя радиоактивного излучения с периодами полураспада 10 с, 40 с, 13 мин и 90 мин. Полагая, что происходит следующая цепочка превращений:



Ферми считал выделенными элементы 93 (Аузовий, Ao) и 94 (Гасперий, Hs). Метод идентификации этих элементов в экспериментах Ферми не выдерживал критики. С диоксидом марганца могли выделяться путем адсорбции многие другие элементы. Возможность деления ядра урана при его облучении нейтронами, предполагаемую немецким химиком Идой Ноддак в опубликованной ею в 1934 г. статье в «Журнале прикладной химии», ученые группы Ферми почему-то не восприняли и впоследствии не могли понять почему.

Считая гипотезу Ферми правильной, О. Ган, Л. Мейтнер и Ф. Штрассман в Германии повторили эксперименты по облучению урана нейтронами в 1935–1936 гг. Полагая элементы 93 и 94 аналогами элементов VII и VIII групп периодической системы, они представили следующую возможную схему превращений:



где Eka Ir, Eka Pt, Eka Au – экаэлементы (иридий, платина, золото).

Эта схема подтверждалась некоторыми результатами, но однозначный результат получен не был.

Э. Ферми, получивший при облучении урана, а затем и тория нейтронами сложную смесь радиоактивных продуктов, которые испытывали множество последовательных  $\beta$ -распадов, интерпретировал полученные результаты, руководствуясь установленным ранее правилом, описывающим такое превращение: испускание ядром атома  $\beta$ -частицы (т.е. электрона) образует элемент следующего номера в периодической системе, что указывало на существование целого ряда новых элементов, расположенных в периодической системе за последним из известных элементов – ураном. Ферми назвал эти элементы трансурановыми:



В 1938 г. Ирен Жолио-Кюри и П. Савич заметили, что в уране, облученном нейтронами по методу Ферми, присутствует элемент, сходный с лантаном. Эти опыты были повторены в том же году О. Ганом и Ф. Штрассманом в Германии. Они подтвердили результаты французских коллег и установили, что новый замеченный элемент действительно обладает свойствами лантана – элемента 57 третьей группы периодической системы. Но этот элемент не мог быть получен по предложенной Ферми схеме превращений. Ближе к истине, как казалось тогда, была возможность получить элемент актиний (89), ближе расположенный к урану. Но полученный лантан по своим свойствам отличался от актиния – элемента из этой же группы периодической системы. В процессе экспериментов О. Ган обнаружил еще один продукт реакции, принятый за изотоп радия (88), который явно отличался от радия, но не отличался от бария (56), принадлежащего к той же II группе периодической системы. Были попытки объяснить возможность появления актиния и радия при облучении урана нейтронами последующим ступенчатым  $\alpha$ -распадом продукта этой реакции изотопа урана-239:



Однако сотрудник О. Гана фон Дросте не обнаружил излучения  $\alpha$ -частиц. Вызывала сомнение и способность медленных нейтронов отщеплять от ядра урана две  $\alpha$ -частицы. Нильс Бор, поставленный О. Ганом в известность, также сомневался в такой возможности, по его словам, он скорее бы признал образование трансуранов и парижского лантана. Ган и Штрассман уточнили представления о последствиях облучения урана нейтронами путем радиохимического анализа возникающих одного за другим  $\beta$ -излучателей. Исследования осложнялись тремя обстоятельствами:

- 1) неизвестным видом первичной ядерной реакции нейтрона с ядром урана, атомный вес которого всегда считался равным 238;
- 2) множеством  $\beta$ -излучателей – продуктов этой реакции;
- 3) неопределенностью данных о химических свойствах трансурановых элементов.

Открытым оставался принципиальный вопрос, продолжают ли трансурановые элементы последний ряд периодической системы: радий (88), актиний (89), торий (90), протактиний (91), уран (92); трансуран 93 располагается под рением, трансураны 94, 95 и 96 – соответственно под осмием, иридием и платиной; с элемента 97 начинается новый ряд периодической системы, как с золота, серебра и других, или в согласии со старой гипотезой Бора уже с актиния начинается второе семейство «редких земель» – актинидов, по типу лантанидов, трудно делимых химически.

Возник вопрос, как же получают из урана изотопы элементов, массы атомов которых почти вдвое меньше массы атомов урана? В письме О. Гану 3 января 1939 г. Лиза Мейтнер пишет: «Теперь я почти убеждена, что Вы действительно открыли распад в барий, и считаю это действительно прекрасным результатом, с которым сердечно поздравляю тебя и Штрассмана». Лиза Мейтнер и Отто Фриш выступили в английском журнале «Nature» с общей заметкой, в которой расщепление ядра называли «*fission*» (деление), и это стало затем общепринятым. В письме, написанном по-немецки, оно определялось как «разделение ядра на два примерно одинаковых осколка, причем каждый содержит большее или меньшее число ней-

тронов». Отметим, что это объяснение относилось к продуктам реакции, которые включались в схему в виде радия, актиния и тория. Что же касается трансуранов, то вопрос о них по-прежнему оставался открытым. 10 января 1939 г. О. Ган обращается в письме к О. Фришу: «Трансураны, судя по всему, могут остаться на своих местах! Нужны несколько более быстрые нейтроны, чтобы взорвать ядро тория».

14 января Лиза Мейтнер ответила О. Гану: «То, что и в ряду тория – радия есть барий, этого следовало ожидать». Далее в заметке в журнал «Nature» она пишет: «Отщепление одной или нескольких  $\alpha$ -частиц от урана под действием нейтрона энергетически невозможно, тогда как распад на два легких ядра из-за глубокого спада в кривой дефекта масс в области от  $Z=40$  до  $Z=60$  энергетически возможен и может быть понят с точки зрения капельной модели ядра»; энергия осколков должна при этом достигать 200 МэВ ( $Z$  – атомный номер, т.е. порядковый номер элемента в периодической системе). Это следствие того, что дефект массы атома урана существенно меньше, чем дефект массы атомов средней части периодической системы. Таким образом, если подобный переход происходит, то разница дефектов масс проявляется в виде ядерной энергии.

В качестве возможных пар деления, порядковые номера которых в сумме дают 92, в заметке Мейтнер и Фриша предполагались барий (56) и криптон (36), а также стронций (38) и ксенон (54). Сообщалось также об успешном опыте Фриша по изучению атомов отдачи при делении. В этом опыте взрывной характер деления атома урана следовал из того, что два продукта деления разлетались в противоположные стороны с большой скоростью, как было установлено по величине производимой ионизации в воздухе в условиях, когда все ионизирующие заряженные частицы меньшей скорости, создававшие при ионизации менее чем 500000 ионов, устранялись с помощью внешнего поля. Дальнейшие исследования показали, что добрая половина элементов периодической системы встречается среди осколков деления.

Сразу же после первых публикаций Гана и Штрассмана о делении ядра урана нейтронами опыты с расщеплением ядер были повторены и продолжены во мно-

гих институтах мира. Почти всюду имелись более сильные источники нейтронов, чем в Институте радиохимии Гана. В связи с некоторыми публикациями возникали жаркие споры о приоритете, однако они быстро разрешались.

Существенным моментом открытия Гана и Штрассмана было расщепление урана медленными нейтронами.

Три факта сегодня не вызывают возражений: 1) никто до Гана и Штрассмана не принимал во внимание такой своеобразной ядерной реакции, как деление ядер; 2) Ган и Штрассман дали окончательное доказательство деления своими радиохимическими методами; 3) Мейтнер и Фриш предложили первое физическое объяснение и дали экспериментальное доказательство взрывного ядерного процесса, связанного с освобождением больших количеств энергии. Очень большое значение имело окончательное доказательство другими исследователями впервые замеченного Ганом, Штрассманом того факта, что процессы деления стимулируются замедленными свободными нейтронами.

Как уже отмечалось ранее, радиоактивные вещества, образовавшиеся при облучении урана медленными нейтронами, приписывались вначале трансурановым элементам.

На самом деле, как было установлено позднее, эти вещества являлись продуктами реакции деления урана. И несмотря на то, что элементы с атомным номером более 92 присутствовали в продуктах реакции, их не удавалось идентифицировать до тех пор, пока ситуация не стала яснее после открытия реакции деления ядер урана.

Среди различных носителей радиоактивности в продуктах взаимодействия урана с нейтронами наблюдалась активность с периодом полураспада 23 мин. Эту активность нельзя было отделить от исходного урана, и в 1936 г. Ганн, Мейтнер и Штрассман приписали её изотопу урана – урану-239, который образуется в реакции радиационного захвата медленных нейтронов:

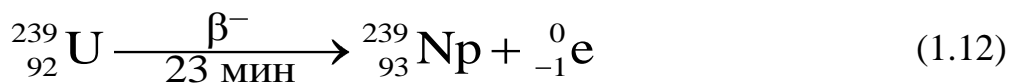


Испустив  $\beta$ -частицу (электрон), уран-239 должен образовать элемент 93, но обнаружить его не удавалось. В конце 1934 г. известный физико-химик Ида Ноддак выступила в «Журнале прикладной химии» с общим тезисом: «Допустимо, что при бомбардировке тяжелых ядер нейтронами эти ядра распадаются на несколько больших осколков, которые являются изотопами известных элементов, хотя и не соседних с облученными». Это пророчество Ноддак тогда казалось не заслуживающим внимания: оно игнорировало тот факт, что во всех без исключения известных случаях превращение ядер приводило к образованию ядер атомов соседних элементов. Лиза Мейтнер в то время отказалась обсуждать гипотезу Иды Ноддак. У этой гипотезы не было физической основы, в то время как против образования трансуранов в тот период не свидетельствовали ни один факт и ни одно теоретическое соображение. Сама Ида Ноддак не настаивала на своей гипотезе, но заявила о своем приоритете, когда О. Ган и Штрассман произвели расщепление урана. Однако Ида Ноддак предполагала, что тяжелые ядра распадаются при обстреле быстрыми нейтронами, так как нейтроны из бериллий-полониевого источника имели энергию несколько МэВ и таковыми были все нейтронные источники того времени. (Замедление нейтронов Ферми начал изучать в 1935–1936 гг.).

В начале 1939 г. Э. Макмиллан при экспериментальной проверке процесса деления урана обнаружил в продуктах взаимодействия медленных нейтронов с окисью урана активности с периодами полураспада 23 мин и 2,3 дня. Активность с периодом полураспада 2,3 дня по химическим свойствам соответствовала редкоземельным элементам, что было установлено при добавлении редкоземельного элемента в раствор продуктов реакции в качестве носителя и последующего осаждения: осадок уносил с собой эту активность.

Вначале полагали, что эта активность принадлежит редкоземельному изотопу, но впоследствии было показано, что это не так. В 1940 г. при дальнейших исследованиях Э. Макмиллан и Ф. Абельсон показали, что радиоактивный продукт с периодом полураспада 2,3 дня образуется при  $\beta$ -распаде урана-239, так как скорость его образования точно соответствовала периоду полураспада урана-239 (т.е.

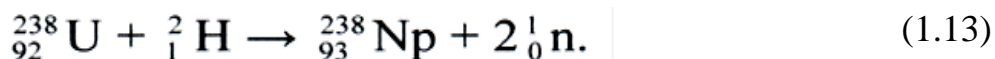
23 мин). Следовательно, период полураспада 2,3 дня принадлежит элементу с номером 93, имеющему массовое число 239:



Открытый таким образом первый трансурановый элемент был позднее назван нептунием (Np). В связи с тем, что открытый элемент оказался короткоживущим (2,3 дня), изучение его химических свойств было затруднительным. Поэтому сложно было определить местоположение нептуния в периодической системе. Если следовать последовательности элементов актиний, торий, протактиний и уран, свойства которых соответствуют их гомологам (иттрий, гафний, тантал и вольфрам), то нептуний по своим свойствам должен соответствовать рению. Но исследования Макмиллана и Абельсона этого не подтвердили.

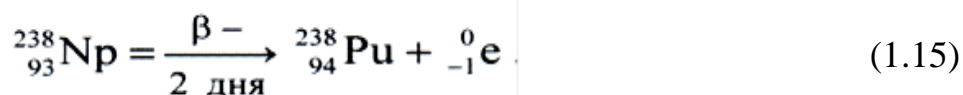
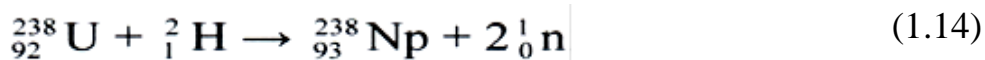
При изучении нептуния-239 Макмиллан и Абельсон не обнаружили какой-либо другой активности, несмотря на то, что  $\beta$ -распад нептуния-239 должен был привести к образованию элемента под номером 94. Они решили, что дочерний элемент  ${}^{239}_{94}$  является  $\alpha$ -излучателем с большим периодом полураспада (это соответствует низкой активности), что и подтвердилось впоследствии.

Первым изотопом элемента под номером 94, который удалось надежно идентифицировать, был изотоп с массовым числом 238, так как он имел значительно меньший период полураспада и, следовательно, более высокую активность. Этот изотоп был получен в 1940 г. Сиборгом, Макмилланом, Кеннеди и Уолом на циклотроне в Беркли (США) при облучении окиси урана дейтронами:



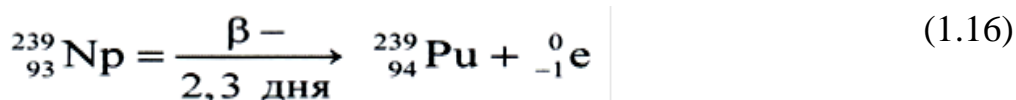
Они обнаружили, что в облученном образце имеется активность, которая была выделена из смеси урана и нептуния химическим путем, приписана элементу с номером 94 и названа плутонием. Таким образом, плутоний-238 с периодом полураспада 90 лет образуется в результате  $\beta$ -распада нептуния-238:



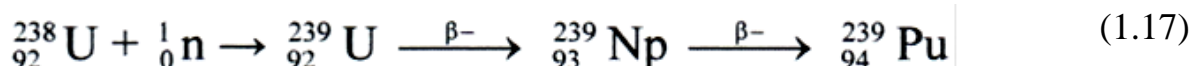


С этим образцом в течение 1941 г. был разработан метод отделения плутония от урана и нептуния с использованием изотопных индикаторов, а также определены многие химические его свойства.

Наиболее важный делящийся изотоп – плутоний-239 – был получен Сиборгом, Кеннеди, Сегре и Уолом в марте 1941 г. как продукт распада нептуния-239:



Как и ожидалось, плутоний-239 был  $\alpha$ -излучателем с периодом полураспада 24400 лет. Оказалось, что изотоп плутоний-239 способен делиться под действием медленных нейтронов, поэтому дальнейшее его излучение приобрело особый интерес. Было принято решение о производстве плутония в больших количествах в ядерных реакторах по схеме:



В 1942 г. в США был подготовлен план исследований, в задачу которых входило дать ответ на вопрос: возможно ли выделить в заметных количествах плутоний из реактора, содержащего обычный уран и замедлитель? В связи с этим, используя микроколичества плутония, были разработаны четыре различных метода промышленного извлечения плутония из продуктов деления урана.

## § 1.7. Цепная ядерная реакция деления урана

Огромная важность открытия деления урана была понята очень скоро. При делении урана должен возникать значительный избышек нейтронов, двадцать или

более. Так как отношение количества нейтронов  $N$  в ядре урана к количеству протонов  $Z$  в нем  $N/Z=1,59$ , то из него образуются два атома элементов середины периодической системы, попадающие в свою область стабильности с отношением  $N/Z = 1,2 - 1,4$  после испускания ими нейтронов.

Было установлено, что испускание нейтронов происходит при делении мгновенно. Хотя избыток отношения  $N/Z$  исчезает, в основном за счет последовательных превращений продуктов деления, атом урана испускает также и некоторое количество нейтронов (2–3). Сами продукты деления тоже испускают нейтроны: четыре группы нейтронов, соответствующих продуктам с периодами полураспада 2,5; 7; 24 и 57 с, испускаются вслед за основным делением, но только около 1% всех нейтронов испускается с задержкой, равной 0,01 с. Эти вторичные нейтроны, несмотря на их ничтожное количество, сыграли чрезвычайно важную и полезную роль в управлении искусственным процессом деления и контроле за ним, поскольку именно они позволили сделать процесс деления самоподдерживающимся. Средняя энергия основной группы испускаемых нейтронов 1 МэВ, а потеря ядрами своего нейтронного излишка является процессом, похожим на испарение капли жидкости.

После установления этих фактов появилась возможность осуществить такое деление урана, когда оно, однажды начавшись, продолжалось бы самопроизвольно без дополнительных внешних воздействий, точно так же, как в процессе горения или детонации происходят химические превращения. Поскольку при распаде каждого атома урана возникают несколько высокоэнергетичных нейтронов, которые в свою очередь вызывают деление соседних атомов урана, то контролируемый процесс может протекать равномерно, как горение, в противном случае произойдет страшный взрыв, во много миллионов раз более мощный, чем любой из известных химических взрывов.

Считалось, что уран имеет массовое число 238, и это привело к путанице при анализе результатов облучения урана медленными нейтронами. Полная ясность пришла после открытия, что естественный уран содержит изотоп с массовым числом 235, который делится, и изотоп с массовым числом 238, из которого

с помощью резонансного процесса ( $n, \gamma$ ) могут возникать трансураны. В первый период рассматривался только уран-238. В письме О. Фриша О. Гану от 6 июня 1939 г. читаем: «Я поговорю с профессором Н. Бором о важности предлагаемой Вами проверки гипотезы об уране-235. Я слышал, в Америке хотят провести частичное разделение этих двух изотопов, что облегчило бы проверку...». Именно Нильс Бор выступил с гипотезой, что деление ядер урана медленными нейтронами происходит только в случае урана-235.

В это же время начинается обсуждение возможности взрывной цепной реакции при делении урана освобождающимися нейтронами, а также технической ядерной энергии. Интересно, что Н. Бор в письме Лизе Мейтнер еще от 12 июля 1939 г. утверждал, что резонансное поглощение нейтронов деления изотопом уран-238 может привести к быстрому прекращению цепной реакции.

Основы теории цепной ядерной реакции деления были заложены тремя работами Я. Б. Зельдовича и Ю. Б. Харитона, опубликованными еще до второй мировой войны. В первой из этих работ «К вопросу о цепном распаде основного изотопа урана» физика процесса цепного деления рассматривается в бесконечной среде, что означает отсутствие утечки нейтронов из системы. Было показано, что экспериментальные значения количества нейтронов в расчете на одно деление и соответствующие сечения таковы, что цепная ядерная реакция деления в уране-238 протекать не может.

Данный вывод был получен как для металлического урана, так и для  $U_3O_8$ , для которого подчеркивалась роль рассеяния на кислороде, затрудняющего протекание цепной реакции. В этой работе впервые было показана невозможность цепной ядерной реакции деления на быстрых нейтронах в естественном уране, т.е. как взрывчатое вещество естественный уран отпал.

Во второй работе Я. Б. Зельдовича и Ю. Б. Харитона «О цепном распаде урана под действием медленных нейтронов» рассматривается цепная ядерная реакция деления на естественном уране, когда основное деление происходит в уране-235. Реакция деления урана-235 протекает интенсивнее с уменьшением энергии нейтронов и не является пороговой (сечение этой реакции обратно пропорционально

скорости нейтрона). Поэтому для создания благоприятных условий протекания цепной реакции на уране-235 необходимо нейтроны замедлить. Но уран – тяжелый элемент, так что при рассеянии на ядрах атомов урана нейтрон теряет очень малую часть энергии. Поэтому необходимо ввести в уран замедлитель нейтронов (рассматривается однородная смесь атомов урана и водорода).

При захвате одного медленного нейтрона ядром урана и его делении испускается  $\nu$  быстрых нейтронов. Чтобы эти нейтроны эффективно захватились с делением урана-235, их необходимо замедлить. Но в процессе замедления энергия нейтронов проходит область, в которой очень вероятен захват нейтрона ураном-238. Этот захват происходит без деления, и для цепной ядерной реакции деления захваченный нейтрон потерян. Кроме того, нейтрон может быть захвачен при замедлении атомами замедлителя. Вероятность потери нейтрона в этих процессах определяет величину коэффициента размножения нейтронов  $K$  в бесконечной среде смеси топлива (уран-235) и замедлителя (воды). Я. Б. Зельдович и Ю. Б. Харитон показали, что цепная ядерная реакция деления в смеси урана и водорода невозможна: для ее осуществления необходимо использовать либо уран, обогащенный ураном-235 не менее чем до 1,3%, либо легкие замедлители, которые поглощают нейтроны не так интенсивно, как водород (например, тяжелую воду  $D_2O$ ).

Не менее важна и третья работа Я. Б. Зельдовича и Ю. Б. Харитона «Кинетика цепного распада урана». Она посвящена изучению системы, содержащей делящиеся ядра, вблизи состояния критичности, т.е. такого состояния, когда начинается цепная развивающаяся реакция. Необходимо выбрать такое соотношение объёмов ядерного топлива и замедлителя, чтобы размножение нейтронов в этой среде было максимальным. Изменяя это соотношение, можно получить коэффициенты размножения нейтронов  $K=1$ ;  $K<1$  и  $K>1$ . При  $K=1$  возникает самоподдерживающаяся цепная ядерная реакция деления, но размножающая нейтроны среда очень чувствительна к изменению своих свойств. При протекании самоподдерживающейся цепной ядерной реакции процесс деления урана-235 приводит к уменьшению его концентрации (выгоранию), атомы – продукты деления – начи-

нают поглощать нейтроны и коэффициент размножения нейтронов становится менее единицы ( $K < 1$ ), наступает так называемое подкритическое состояние. Это приводит к затуханию и прекращению процесса самоподдерживающейся цепной ядерной реакции деления. Она могла бы продолжаться, если ввести в систему нейтроны от внешнего источника. Кроме того, в процессе развития самоподдерживающейся ядерной реакции при делении ядра урана-235 выделяется тепловая энергия, которая приводит к тепловому расширению топлива и замедлителя, уменьшению их плотности, т.е. к падению концентрации атомов урана-235 и атомов водорода в воде. Это приводит к уменьшению числа делений урана-235 (и падению концентрации нейтронов) и снижению замедляющей способности воды, которая реализуется в процессе столкновений нейтронов с атомами водорода. В результате процесс самоподдерживающейся ядерной реакции деления затухает и прекращается.

Если коэффициент размножения нейтронов в среде (ядерное топливо + замедлитель) больше единицы ( $K > 1$ ), то система надкритична и концентрация нейтронов возрастает очень быстро (по экспоненциальному закону). Запаздывающие нейтроны, испускаемые атомными ядрами – осколками деления ядра урана-235 – со значительным запаздыванием по отношению к моменту деления (от долей секунды до десятков секунд), сглаживают резкое увеличение концентрации нейтронов, что позволяет регулировать течение процесса в интервале значений коэффициента размножения нейтронов  $1 < K < 1 + \beta$ , где  $\beta$  – доля запаздывающих нейтронов (до 1% нейтронов, испускаемых при делении).

Таким образом, в этих трех работах изложены наиболее принципиальные моменты теории цепной ядерной реакции деления и установлено, что:

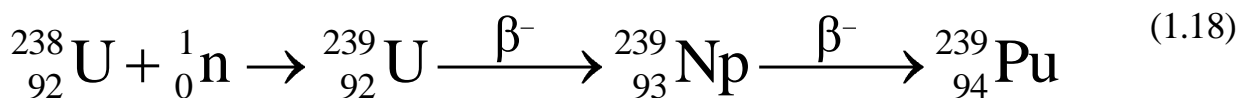
- в естественном уране цепная ядерная реакция деления на быстрых нейтронах в уране-238 идти не может;
- на реализацию цепной ядерной реакции на медленных нейтронах за счет деления урана-235 влияет резонансное поглощение нейтронов в уране-238;
- резонансное поглощение нейтронов при замедлении ослабляется и пропорционально корню квадратному из концентрации урана-235;

- в смеси естественного урана и водорода цепная реакция невозможна; для осуществления цепной ядерной реакции в этом случае необходимо обогащение ураном-235 либо использование замедлителя с меньшим поглощением нейтронов (например, тяжелой воды  $D_2O$ );
- вблизи состояния критичности кинетика нарастания концентрации нейтронов смягчается из-за наличия запаздывающих нейтронов.

Таким был уровень теории цепной ядерной реакции, достигнутый накануне второй мировой войны. После этого густая завеса тайны покрыла ядерные исследования. В официальном отчете правительства США сообщалось: «Некоторые работы Ферми и Сцилларда заставляют думать, что элемент уран может стать новым важным источником энергии, что можно было бы использовать при создании бомбы громадной мощности».

С этого момента попытки извлечения атомной энергии из урана имели две цели: создание сверхмощного взрывчатого вещества и управляемое медленное освобождение энергии для промышленных нужд. Первая цель считалась безотлагательной в тот период мировой истории. Каждое из этих направлений требовало разработки своего технологического процесса. Работы начались в двух направлениях (особенно в США), однако вскоре обнаружилось, что наиболее быстрым способом достижения первой цели является осуществление второй. Впоследствии оба направления развивались параллельно и оба технологических процесса почти в равной степени способствовали достижению военной цели.

Разделение двух изотопов урана с массовыми числами 235 и 238 было необходимым условием достижения военной цели. Атомная бомба требовала огромного количества чистого урана-235, но он составляет всего 0,714% естественного урана. Поскольку массы изотопов урана близки, а химические свойства их одинаковы, то выделение урана-235 из природной смеси изотопов является технологически трудной задачей. При медленном получении энергии необходимы большие количества урана, и здесь в качестве побочного продукта получается плутоний-239:



который так же, как и уран-235, делится под действием нейтронов.

Таким образом, возникла идея «атомного котла», названного так из-за простоты его конструкции. Это название теперь вытеснено более подходящим названием «ядерный реактор». Задачей «атомного котла» было производство плутония для атомной бомбы. В этом процессе было необходимо поддерживать цепную ядерную реакцию деления на уране-235, с одной стороны, и обеспечить резонансный захват нейтронов ураном-238 с образованием плутония – с другой. Поэтому нужно было быстро выводить быстрые нейтроны деления из массы урана, замедлять их, отнимая кинетическую энергию, и вновь направлять их в уран уже тепловыми нейтронами, чтобы вызвать деление урана-235. Функцию замедлителей нейтронов могли выполнять атомы легких элементов. в столкновении с которыми нейтроны теряют значительную часть своей энергии, не вызывая в то же время изменения этих атомов. В то время были известны два материала, пригодные для этих целей, – тяжелая вода D<sub>2</sub>O и углерод. Из-за высокой цены тяжелой воды остановились на углероде в виде графита.

### § 1.8. Создание первых ядерных реакторов

В истории создания ядерных реакторов можно проследить три этапа. На первом этапе определились необходимые и достаточные условия протекания самоподдерживающейся цепной ядерной реакции деления. На втором этапе были установлены все физические эффекты, способствующие и препятствующие протеканию самоподдерживающейся цепной ядерной реакции деления, т.е. ускоряющие и замедляющие этот процесс. И, наконец, были проведены количественные расчеты, касающиеся конструкции реактора и протекающих в нем процессов.

Создание ядерных реакторов было решением одной из составных задач общей атомной проблемы.

Первый в мире реактор CP-1 (Chicago Physics) был спроектирован и сконструирован Э. Ферми в сотрудничестве с Андерсоном, Цинном, Л. Вудс и Дж. Вайлем и

размещался в теннисном зале под трибунами стадиона Чикагского университета. Реактор начал работать 2 декабря 1942 г. при расчетной начальной мощности 0,5 Вт. В первый урановый реактор CP-1 было загружено 6 т металлического урана и некоторое количество (точно не известно) окиси урана из-за недостатка урана в чистом виде. Реактор должен был иметь сферическую форму и состоялся из горизонтальных слоев блочного графита, которые располагались между подобными же слоями из перемежающихся блоков графита и урана, охлаждаемых воздухом. Критическое состояние реактора, при котором потеря нейтронов компенсировалась их производством (созданием), было достигнуто, когда сферу построили на три четверти, в результате чего реактор так и не получил окончательной формы правильного шара.

Через 12 дней мощность была доведена до 200 Вт и дальнейшее повышение мощности сочли рискованным из-за генерированного установкой опасного излучения. Реактор переместили за пределы города в Аргоннскую лабораторию (ANL), где он был снова смонтирован и снабжен защитным экраном. Реактор регулировался вручную при помощи кадмиевых стержней, поглощающих избыток нейтронов и расположенных в специальных каналах. Кроме того, были предусмотрены два аварийных стержня и стержень автоматического управления.

Первая опытная установка позволила провести экспериментальное исследование процесса получения плутония, которое привело к заключению, что этот способ дает реальную возможность его изготовления в количествах, достаточных для создания атомной бомбы. В 1943 г. в Аргоннской национальной лаборатории для экспериментальных исследований был построен точно такой же реактор CP-2 (вклейка 1, рис. 13), но с критическим размером в форме куба, а в 1944 г. – еще один реактор CP-3 (вклейка 1, рис. 14), в котором замедлителем служила тяжелая вода, что позволило значительно уменьшить размеры реактора по сравнению с предыдущими.

В графитовом кубе реактора CP-2 были расположены в виде решетки блоки урана или его окиси. Графитовые блоки выполняли одновременно роль замедлителя и строительного материала реактора. Блоки имели квадратное поперечное сечение



со стороной 10,5 см и были неодинаковыми по длине, которая в большинстве случаев составляла 39,9 см.

В некоторых блоках были сделаны два симметрично расположенных отверстия с расстоянием между центрами 21 см. В эти отверстия вставлялись урановые блоки в виде цилиндров диаметром 5,7 см и весом около 2,7 кг. Реактор, сложенный из перемежающихся горизонтальных слоев из графитовых блоков с ураном и без урана (прокладок), достиг критического состояния во время укладки 50-го слоя.

Затем наверху уложили четыре дополнительных слоя чистых графитовых блоков, исполняющих функцию отражателя нейтронов, затем слой свинца толщиной 15,2 см и слой дерева толщиной 3,3 м. Боковую поверхность реактора окружили аналогичной защитой. Наружные размеры реактора составляли: ширина – 10 м, высота – 7 м, а общий вес превышал 1400 т. Реактор содержал 3200 блоков металлического урана и 14500 блоков окиси урана, что эквивалентно примерно 52 т урана. Графитовая часть реактора весила около 472 т. Металлический уран располагался в центре реактора и образовывал центральную решетку шириной 4,3 м, глубиной 3,3 м и высотой 3,3 м, находившуюся между 16-м и 18-м слоями реактора. Блоки окиси урана распределялись по внешней части активной зоны реактора, где поток нейтронов меньше и поэтому слабее паразитное поглощение нейтронов кислородом.

Из-за отсутствия системы охлаждения максимальная безопасная мощность реактора составляла 200 Вт, но на короткое время мощность можно было повышать до 100 кВт. В реакторе использовались пять управляющих стержней длиной 5,6 м из бронзы, покрытые кадмием. Три из этих стержней были аварийными, один стержень служил для грубой регулировки и еще один для точной регулировки потока нейтронов и мощности реактора.

В историю физики XX века вошел и первый в Европе ядерный реактор, созданный в СССР и испытанный лично И. В. Курчатовым в декабре 1946 года. Его мощность достигала уже 4000 кВт, что давало возможность на базе полученного опыта создавать промышленные реакторы. Сам реактор располагался в бетонированном котловане, на дно которого были уложены восемь слоев графитовых брусков. Над ними укладывались слои с отверстиями-гнездами, куда были вставлены блоки из

урана. Были также сделаны три канала для кадмиевых стержней, обеспечивающих регулирование реакции и ее аварийную остановку, и ряд горизонтальных каналов различной формы и размеров для измерительной аппаратуры и экспериментальных целей. Общее число слоев из графитовых брусков составило шестьдесят два.

В конце 1945 г. в Москве на территории Лаборатории № 2 АН СССР было начато строительство здания для физического реактора Ф-1, а в начале 1946 г. началось проектирование первого промышленного реактора и связанного с ним плутониевого комбината в Челябинске-40. В декабре 1946 г. на исследовательском уран-графитовом реакторе Ф-1 под руководством И. В. Курчатова была впервые в Европе осуществлена самоподдерживающаяся цепная реакция. Пуск реактора Ф-1, который до сих пор служит науке, дал возможность измерить необходимые ядерные константы, выбрать оптимальную конструкцию первого промышленного реактора, исследовать вопросы регулирования и радиационной безопасности. В 1947 году на этом реакторе удалось получить первые дозы не встречающегося в природе плутония, являющегося, подобно урану, ядерным горючим, притом в количествах, достаточных для изучения основных физических характеристик его ядра. Первый в СССР промышленный реактор для получения плутония был запущен Курчатовым в июне 1948 года.

В рамках Манхэтгенского проекта (секретного плана создания американской бомбы) вся работа по разделению изотопов урана была поручена лаборатории известного американского физика Э. Лоуренса. В своем докладе правительству США в июле 1941 г. Лоуренс писал: «Открылась новая чрезвычайно важная возможность для использования цепной реакции с неразделёнными изотопами урана. По-видимому, если бы цепная реакция была осуществлена, можно было бы вести её... в течение некоторого периода времени специально для производства элемента с атомным номером 94 [плутония]... Если бы имелись в распоряжении... большие количества этого элемента, то, вероятно, можно было бы осуществить цепную реакцию на быстрых нейтронах. В такой реакции энергия освобождалась бы со скоростью взрыва, и соответствующая система могла бы быть охарактеризована... как «сверхбомба»».

В середине 40-х годов XX века в Лос-Аламосской научной лаборатории (США) была поставлена задача создания опытного быстрого реактора с плутониевым топливом, демонстрирующего возможность производства электроэнергии. Этот реактор под названием «Клементина» имел объём активной зоны, состоящей из металлического плутония, 2,5 л и охлаждался ртутью. Сборка реактора началась в 1946 г., критичность была достигнута в ноябре 1946 г. Энергетический пуск состоялся в марте 1949 г. Реактор работал на мощности 25 кВт (тепловой).

Реактор «Клементина» был первым реактором на быстрых нейтронах, а также первым, в котором в качестве топлива использовался плутоний-239. Активная зона в виде цилиндра высотой 15 см и диаметром 15 см состояла из вертикальных топливных стержней в стальной оболочке. Замедлитель, естественно, отсутствовал. Отражателем служили металлический уран и сталь. Ртутный теплоноситель обладал пренебрежимо малым сечением захвата медленных нейтронов. Управление реактором осуществлялось при помощи стержней, удаляющих некоторое количество урана из отражателя. Бор или кадмий, используемые в реакторах на тепловых нейтронах, непригодны для реакторов на быстрых нейтронах.

В Аргоннской национальной лаборатории (США) независимо от описанных исследований проводились работы по созданию экспериментального реактора – размножителя EBR-1 на быстрых нейтронах.

Главной целью этого проекта была проверка концепции атомной электростанции с реактором на быстрых нейтронах в качестве энергетического блока.

К созданию реактора приступили в 1951 г., а критичность была достигнута в августе 1951 г. В декабре 1951 г. впервые за счёт ядерной энергии был получен электрический ток при мощности реактора 200 кВт (эл.). Топливные элементы реактора представляли собой трубки из нержавеющей стали, содержащие высокообогащенный металлический уран, охлаждение активной зоны осуществлялось прокачкой через нее сплава натрия и калия (вклейка 1, рис. 15). Отражатель состоял из двух частей: нескольких стержней природного металлического урана, окружающих активную зону, и нескольких клинообразных блоков из того же материала. Управление реактором осуществлялось введением стержней металлического урана во внешний

отражатель и выводением их из него. Реактор одновременно вырабатывал энергию, выделяющуюся при делении под действием быстрых нейтронов, и воспроизводил делящийся материал. Строго говоря, реактор – размножитель должен использовать тот же делящийся материал, который в нем производится, например плутоний-239 в реакторах с ураном-238 в качестве сырья для производства вторичного топливного материала (плутония). Однако в настоящее время в качестве делящегося материала во многих реакторах на быстрых нейтронах используют уран-235. В реакторах на быстрых нейтронах теплоноситель не должен содержать элементов с малым массовым числом, так как они будут замедлять нейтроны. Интенсивный отвод тепла из активной зоны малого размера требует теплоносителя с исключительно высокими теплоотводящими свойствами. Только одно вещество – жидкий натрий – удовлетворяет этим условиям.

Анализ топливных материалов отражателя реактора EBR-1 после его работы в течение некоторого времени показал, что достигнутый коэффициент воспроизводства, т.е. отношение количества полученного плутония-239 к количеству израсходованного урана-235, несколько превышает 100%.

Поскольку условия в реакторе не были идеальными, то посчитали, что воспроизводство плутония-239 должно быть практически выгодно.

Это было подтверждено в Великобритании экспериментами на реакторе на быстрых нейтронах очень малой мощности (2 Вт), в котором топливом служил плутоний-239. Было обнаружено, что на каждое разделившееся ядро плутония приходится примерно два вновь образовавшихся.

Таким образом, выигрыш при воспроизводстве получается довольно значительным. В конечном счете, таким реакторам должна принадлежать главная роль в программе развития ядерной энергетики.

## **§ 1.9. Первые атомные станции**

Энергию атома, о разрушительной силе которой мир уже знал после Хиросимы и Нагасаки, еще в начале 50-х годов XX века предполагали использовать в

мирных целях. В тот период ещё не был решен вопрос, на каком уране, – природном или обогащенном, – будет развиваться ядерная энергетика.

Основным аргументом в пользу использования природного урана было воспроизводство вторичного ядерного топлива – плутония – в том же реакторе. Это могло способствовать быстрому достижению необходимого уровня экономичности и конкурентоспособности атомных электростанций. Но технические трудности обеспечения достаточно высокой термодинамической эффективности были велики. В то же время использование обогащенного урана позволяет повысить температуру теплоносителя, намного поднять энергонапряженность реактора при сравнительно небольших его размерах.

Эти обстоятельства были решающими при выборе ядерного топлива первых АЭС. Тепло, получаемое от ядерного реактора, выполняющего роль топки парового котла обычной тепловой электростанции, используется для выработки электроэнергии. Из активной зоны реактора (тепловыделяющих элементов) тепло отводится охлаждающей средой (теплоносителем), циркулирующим по замкнутому контуру (первичный контур энергетического реактора). Таким теплоносителем может быть жидкость (вода) или газ. Электрическая часть атомной электростанции мало отличается от электрической части обычной тепловой электростанции.

Первая в мире промышленная атомная электростанция мощностью 5000 кВт была запущена в СССР 27 июня 1954 г. в небольшом провинциальном городке Обнинске в 100 километрах к югу от Москвы (вклейка 1, рис. 16). Впервые была доказана возможность производства электрической энергии на основе расщепления ядер урана, а не за счет сжигания органического топлива или гидравлической энергии.

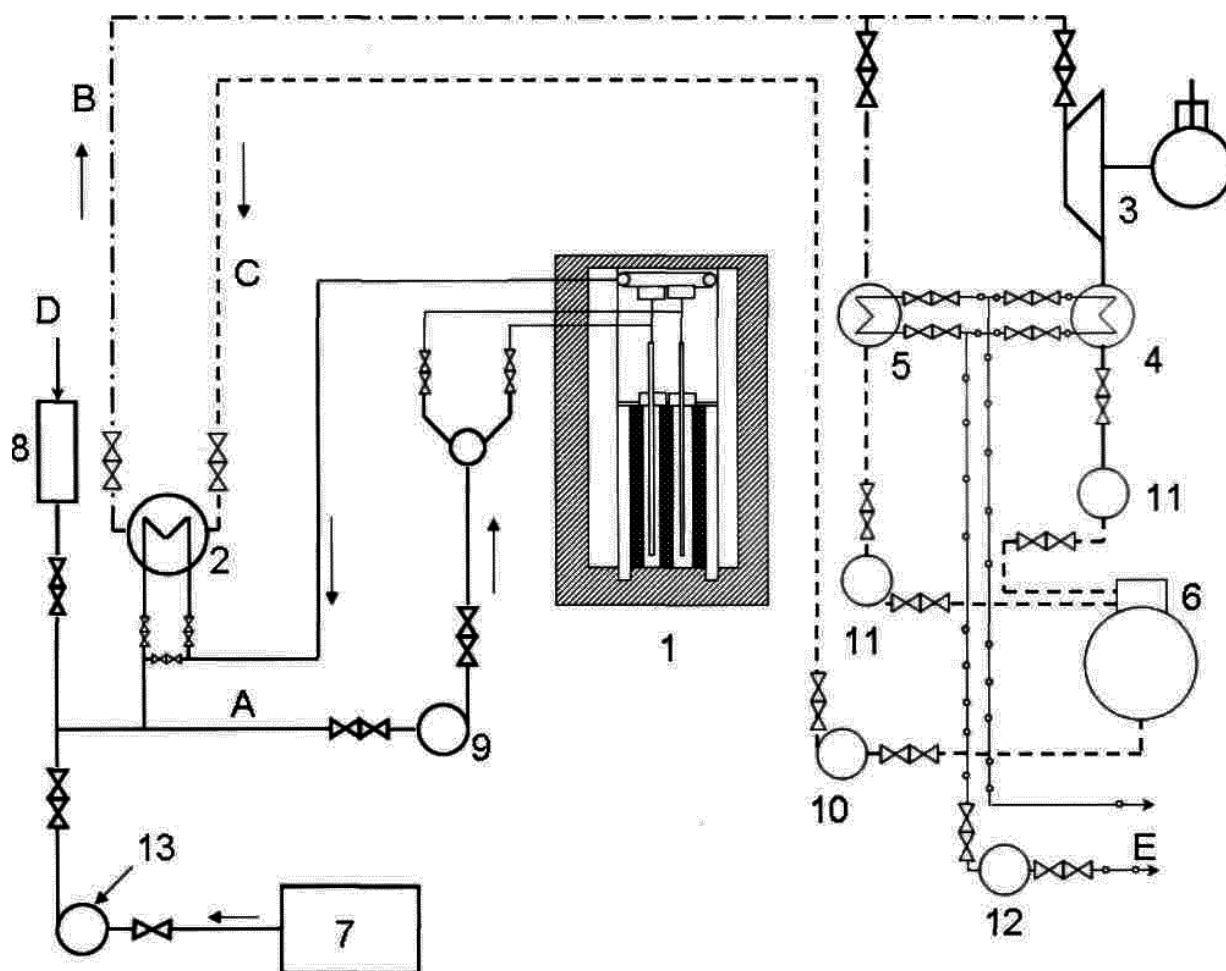
Научное руководство работами по ее созданию осуществлял академик И. В. Курчатов. Основой станции был ядерный реактор на тепловых нейтронах с графитовым замедлителем; топливо – обогащенный уран, содержащий 5% изотопа уран-235, – размещалось в виде отдельных блоков в графитовом замедлителе, образуя 128 рабочих каналов. Внутри каждого канала находились тонкостенные стальные трубки, по которым протекал теплоноситель.

Общее количество загружаемого урана составило 550 кг, что обеспечивало работу станции в течение 100 суток. Средний поток тепловых нейтронов в активной зоне составлял  $5 \cdot 10^{13}$  нейтронов/см<sup>2</sup>с, расход атомного горючего урана-235 – 30 г/сутки.

Номинальная тепловая мощность реактора равнялась 30000 кВт. Реактор был заключен в стальной кожух, заполненный графитовой кладкой, покоящейся на бетонном основании. Во время работы графит нагревался до 500–600 °С. Чтобы избежать выгорания графита, зазоры кладки заполнялись инертным газом – гелием или азотом. Теплоносителем служила дистиллированная вода высокой чистоты. Технологическая схема станции состояла из 2 контуров теплоотвода (рис. 1.2).

Вода первого контура, циркулирующая через реактор под давлением 100 атм, нагревалась до 280°С. Вода отводит тепло из реактора и через систему парогенераторов отдаёт его воде второго контура, которая, превращаясь в пар, приводит в действие турбоагрегат.

Охлажденная до 190 °С вода первичного контура циркуляционными насосами возвращается в реактор. Три насоса обеспечивают непрерывную подачу 300 т воды в час через реактор. При номинальной мощности реактора вырабатывается 40 т пара в час с давлением 12,5 атм и температурой 250–260°С. Управление реактором осуществлялось регулирующими стержнями из карбида бора (В<sub>4</sub>С). Общее количество управляющих стержней – 24, две пары стержней поддерживали автоматически заданный уровень мощности реактора, два стержня обеспечивали аварийную защиту, свободно падая в активную зону реактора для прекращения цепной ядерной реакции деления урана. Станция управлялась с центрального пульта, на котором были смонтированы регуляторы и указатели важнейших контролируемых параметров, характеризующих работу атомной станции.



*Рис. 1.2. Схема первой атомной электростанции АН СССР: 1 – реактор; 2 – парогенератор; 3 – турбогенератор; 4 – конденсатор турбины; 5 – пусковой конденсатор; 6 – деаэрактор; 7 – дополнительный бак для воды; 8 – компенсатор объема; 9 – циркуляционный насос первичного контура; 10 – питательный насос второго контура; 11 – насосы конденсата; 12 – циркуляционный насос охлаждающей воды; 13 – подпиточный насос; А – вода первичного контура (100 атм); В – пар (12,5 атм); D – сжатый воздух; E – охлаждающая вода*

29 апреля 2002 года, в 11 ч 31 мин по московскому времени навсегда был заглушён реактор первой в мире атомной станции в городе Обнинске Калужской области, проработавшей 48 лет (вклейка 1, рис. 17). Так решило правительство России исключительно по экономическим соображениям. Конструкция атомной электростанции оказалась очень надёжной: за все время ее эксплуатации не было ни одного серьезного нарушения в работе. Но остановка ядерного реактора поставила перед учеными и специалистами ряд новых проблем, которые приходилось решать впервые, например, проблемы разборки сильно излучающего корпуса реактора и его захоронения. Планируется после завершения

всех работ по выводу станции из эксплуатации на ее территории создать музей – памятник возможностям человеческого разума.

В Англии (Колдер-Холл) в конце 1956 г. была пущена первая в стране промышленная атомная станция мощностью 42 тыс. кВт (тепловая мощность 180 тыс.кВт) с графитовым замедлителем (вклейка 1, рис. 18). На этой станции тепло из реактора отводилось углекислым газом ( $\text{CO}_2$ ) под давлением 7 атм, циркулирующим через активную зону и 4 теплообменника (парогенератора). Температура газа на выходе из реактора составляла  $330^\circ\text{C}$ . Пар из парогенераторов приводил в действие две паровые турбины мощностью 20–23 тыс кВт каждая.

В США в конце 1957 г. была пущена атомная электростанция мощностью 60 тыс. кВт в Шиппингпорте. Основным элементом станции является реактор на тепловых нейтронах, в котором замедлителем и теплоносителем является обычная вода под давлением 140 атм. Топливо из обогащенного урана или его двуокиси заключено в стальные или циркониевые трубки (стержни). Температура поверхности топливных стержней достигает  $315^\circ\text{C}$ . Вода под давлением циркулирует через активную зону реактора и внешний теплообменник, в котором образуется пар с температурой  $255^\circ\text{C}$  и давлением 40 атм (вклейка 1, рис. 19).

Реактор и четыре теплообменника атомной станции в Шиппингпорте (штат Пенсильвания) полностью заключены в стальные контейнеры и размещены под землёй. Поскольку опыт эксплуатации реакторов с водой под давлением, был успешным, то реакторы такого типа с различной степенью обогащения топлива ураном-235 стали основой будущих энергетических АЭС.

### **§ 1.10.Хронология важнейших открытий в области радиоактивности**

1896 г., 1 марта	А. Беккерель (во Франции) обнаружил новый тип излучения, испускаемого урановыми солями. Констатация этого факта рассматривается как открытие явления радиоактивности.
1897 г.	Э. Вихерт (в Германии) и Дж. Томсон (в Англии) независимо друг от друга открыли электрон.
1898 г.	Г. Шмидт (в Германии) проверил большое число элементов и



	их соединений и показал, что кроме урана радиоактивностью обладает торий и его соединения.
1898 г.	М. Кюри (во Франции) независимо от Г. Шмидта обнаружила радиоактивность тория, и по высокой активности урановых минералов сделала вывод о возможном наличии в них неизвестных радиоактивных элементов.
1898 г., 18 июля	П. и М. Кюри (во Франции) заявили об открытии полония.
1898 г., 26 декабря	П. и М. Кюри и Ж. Бемон (во Франции) сообщили об открытии радия.
1899 г., январь	Э. Резерфорд (в Канаде) обнаружил неоднородность излучения урана: легко поглощаемую часть излучения он назвал $\alpha$ -лучами, менее поглощаемую – $\beta$ -лучами.
1899 г.	С. Мейер и Э. Швейдлер и, независимо, Ф. Гизель (в Германии) показали способность радиоактивного излучения отклоняться в магнитном поле.
1900 г.	П. Вийяр (во Франции) открыл электромагнитное излучение радиоактивного происхождения – так называемые $\gamma$ -лучи.
1900 г.	Э. Резерфорд (в Канаде) открыл газообразный радиоэлемент-эманацию тория. Описывая свойства эманации, Резерфорд ввел понятие периода полураспада.
1902 г.	М. Кюри (во Франции) определила атомную массу радия равной 225.
1903 г., май	Э. Резерфорд и Ф. Содди (в Канаде) сформулировали основы теории радиоактивного распада. Они объединили впервые цепочки распада свыше 10 радиоэлементов.
1903 г.	В. Рамзай и Ф. Содди (в Англии) показали, что одним из продуктов распада эманации радия является гелий.
1906 г.	Э. Резерфорд (в Канаде) впервые обнаружил явление рассеяния $\alpha$ -частиц.

1909 г.	Ф. Содди (в Англии) предложил модель «составного» распада радиоактивного атома. Такой распад характеризуется несколькими константами ( $\lambda_1$ , $\lambda_2$ и т.д.) и может иллюстрировать предполагаемые радиоактивные вилки.
1910 г.	М. Кюри и А. Дебьерн (во Франции) впервые выделили чистый металлический радий.
1911 г., май	Э. Резерфорд (в Англии) предложил и описал ядерную модель атома.
1911 г.	Ф. Содди (в Англии) сформулировал $\alpha$ -правило, носящее его имя: при $\alpha$ -распаде валентность продукта изменяется на две единицы.
1913 г.	Н. Бор (в Дании) сформулировал два основных постулата теории атома: 1) условие существования стационарных состояний атома и 2) условие частот излучения. За основу он принял ядерную модель атома Резерфорда и предположил, что процесс излучения по своему характеру квантовый.
1913 г., 4 декабря	Ф. Содди (в Англии) сформулировал закон радиоактивных смещений и ввел в науку концепцию изотопии.
1913 г., декабрь	Г. Мозли (в Англии) на примере элементов от кальция до никеля показал, что заряд ядра атомов этих элементов равен их порядковому номеру в периодической системе элементов Д. И. Менделеева.
1914 г.	Э. Марсден (в Англии) обнаружил, что быстрые $\alpha$ -частицы при прохождении через водород и водородсодержащие вещества выбивают быстрые частицы с большой длиной пробега; эти частицы были отождествлены с ядрами водорода.
1920 г.	Э. Резерфорд (в Англии) в своей второй Бейкерианской лекции высказал предположение о существовании нейтрона и тяжелого изотопа водорода.

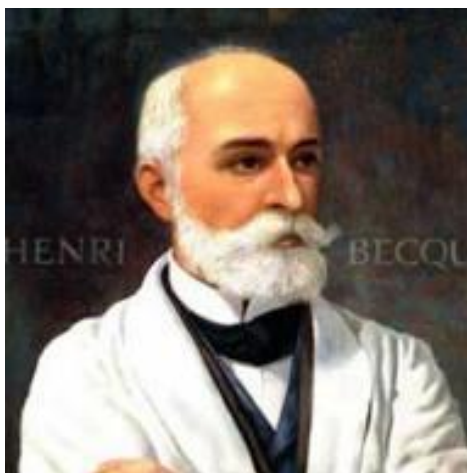
1924 г.	Э. Резерфорд опубликовал работу «Естественное и искусственное разложение элементов», в которой обобщил исследования по расщеплению ядре $\alpha$ -частицами.
1928 г.	Г. Гамов (в Англии), Р. Генри и Е. Кондон в (США) выдвинули квантовомеханическую теорию $\alpha$ -распада и ввели понятие о туннельном эффекте.
1932 г., май	Кокрофт и Уолтон в лаборатории Резерфорда расщепили ядро лития протонами на две $\alpha$ -частицы: ${}^7_6\text{Li} + {}^1_1\text{H} \rightarrow {}^4_2\text{He} + {}^4_2\text{He}$
1932 г.	Д. Чедвик (в Англии) открыл нейтрон.
1932 г., октябрь	Синельников, Вальтер и Лейпунский в СССР повторили реакцию расщепления лития протонами на две $\alpha$ -частицы.
1934 г.	И. и Ф. Жолио-Кюри (во Франции) открыли явление искусственной радиоактивности и наблюдали новый вид радиоактивных превращений – позитронный, или $\beta^+$ -распад. Э. Ферми (в Италии) разработал теорию $\beta$ -распада. Э. Ферми предположил, что в результате $\beta$ -распада урана, облученного медленными нейтронами, могут образовываться изотопы трансурановых элементов. И. Ноддак (в Германии) предсказала возможность деления ядер урана на несколько больших осколков (предвидение явления деления ядер).
1935 г.	Х. Юкава и Ш. Сахата (в Японии) предсказали возможность захвата ядром электрона с внутренней оболочки атома. И. Е. Тамм (в СССР) и Х. Юкава (в Японии) высказали гипотезу о сущности ядерных сил.
1936 г.	Н. Бор (в Дании) теоретически обосновал модель составного ядра, объясняющую механизм ядерных реакций.
1938 г.	О. Ган и Ф. Штрассман (в Германии) открыли явление деления урана медленными нейтронами.

1939 г.	Л. Мейтнер и О. Фриш (в Швеции) дали объяснение механизма деления ядра урана.
1939 г.	Н. Бор (в США) и Я. И. Френкель (в СССР) развили теорию деления ядер.
1939 г.	Р. Робертс, Р. Мейер и П. Вонг (в США) обнаружили испускание запаздывающих нейтронов. Ф. Перрен (во Франции) ввел понятие критической массы. Я. Б. Зельдавич и Ю. Б. Харисон (в СССР) теоретически исследовали ценную ядерную реакцию деления урана быстрыми нейтронами.
1940 г.	К. А. Петржак и Г. Н. Флеров (в СССР) обнаружили явление спонтанного деления урана. Я. Б. Зельдович и Ю. Б. Харитон (в СССР) теоретически исследовали ценную ядерную реакцию деления урана медленными нейтронами и сформулировали условия ядерного взрыва. Д. Корсон, К. Макензи и Э. Сегре (в США) синтезировали астат ( $Z=85$ ).
1940 г.	Е. Макмиллан и П. Абельсон (в США) синтезировали нептуний – первый трансурановый элемент. Г. Сиборг с сотрудниками (в США) синтезировали плутоний. Г. Альварец (в США) получил на ускорителе заряженных частиц поток многозарядовых ионов $C^{6+}$ с энергией 50 Мэв. А. Нир (в США) осуществил разделение урана-235 и урана - 238 в заметных количествах и показал, что делению медленными нейтронами подвергается уран-235.
1942 г.	Б. Кеннингем и Л. Вернер (в США) впервые выделили весовые количества чистого плутония.
1942 г., 2 декабря	Первый в мире ядерный реактор достиг критичности под руководством Э. Ферми.

1945 г., 16 июля	Впервые в мире был осуществлен ядерный взрыв (в США).
1945 г., 6 августа	Взорвана урановая атомная бомба пушечного типа над японским городом Хиросима.
1945 г., 9 августа	Взорвана плутониевая атомная бомба имплозивного типа над японским городом Нагасаки.
1946 г., 6 ноября	Впервые в мире в США достиг критичности первый в мире реактор на быстрых нейтронах «Клементина» с плутонием в качестве топлива.
1946 г., декабрь	Запущен первый в СССР опытный ядерный реактор Ф-1 нулевой мощности.
1948 г., 15 декабря	Во Франции под рук. Ф. Жолио-Кюри запущен первый французский ядерный реактор.
1949 г.	В СССР осуществлен ядерный взрыв. Г. Сиборг с сотрудниками (в США) синтезировали берклий. М. Гепперт-Майер (в США) теоретически обосновала оболочечную модель атомного ядра и значений «магических чисел». Е. Финберг (в США) ввел понятие об «островках» изомерии.
1951 г., декабрь	Впервые в мире за счет ядерной энергии получен электрический ток с использованием ядерного реактора EBR-1 (США) на быстрых нейтронах с электрической мощностью 200 кВт.
1953 г., 31 мая	В США запущен первый в мире реактор корпусного типа Марк-1 с водой под давлением (вода – теплоноситель и замедлитель), который стал прототипом современных реакторов PWR и ВВЭР.
1953 г.	В СССР впервые в мире осуществлен взрыв термоядерной бомбы.
1954 г., 27 июня	В СССР запущена первая в мире промышленная атомная электростанция мощностью 5000 кВт.

1954 г.	США испытали свою первую водородную бомбу типа «деление-синтез-деление» мощностью 15 Мегатонн ТНТ на атолле Бикини в Тихом океане.
1955 г., январь	Первая в мире атомная подводная лодка «Наутилус» с реактором корпусного типа спущена в США.
1956 г., декабрь	Первая в Англии промышленная атомная электростанция электрической мощностью 42 тыс. кВт запущена в Колдер-Холле.
1957 г.	Запуск в США первой атомной электростанции в Шиппинг-порте мощностью 60 тыс. кВт с реактором водо-водяного типа под давлением 140 атм.
1972 г.	В Окло (Габон, бывшая ранее французской колонией) обнаружен природный ядерный реактор, существовавший $1.74 \cdot 10^9$ лет назад, расчетной мощностью $\sim 10$ кВт. Было рассчитано, что многие богатые ураном рудные месторождения должны были быть $(2 \div 3) \cdot 10^9$ лет назад надкритическими в присутствии замедляющей воды (после сильных дождей). Природные ядерные цепные реакции, возможно, оказали важное влияние на раннюю геологию Земли.
1977 г.	К этому времени шесть стран – США, СССР, Великобритания, Франция, Китай, Индия, – провели свыше 1000 испытаний ядерного оружия (ядерных и термоядерных устройств). После подписания в 1963 г. Договора о запрещении испытаний ядерного оружия в атмосфере, в космическом пространстве и под водой большинство взрывов производят под землей.

## ВКЛЕЙКА 1.



*Рис. 1. Антуан Анри Беккерель (1852–1908)*



*Рис. 2. Мария Склодовская-Кюри (1867–1934)*



*Рис. 3. Пьер Кюри (1859–1906)*



*Рис. 4. Эрнест Резерфорд (1871–1937)*



*Рис. 5. Джордж Гамов (1904–1968)*



*Рис. 6. Игорь Васильевич Курчатов (1903–1960)*





*Рис. 7. Группа сотрудников Украинского физико-технического института (во втором ряду первый слева – П. Эренфест, второй справа – А. Иоффе, в третьем ряду третий слева – А. Лейтунский)*



*Рис. 8. Фредерик Жолио-Кюри (1900–1958) и Ирен Жолио-Кюри (1897–1956)*

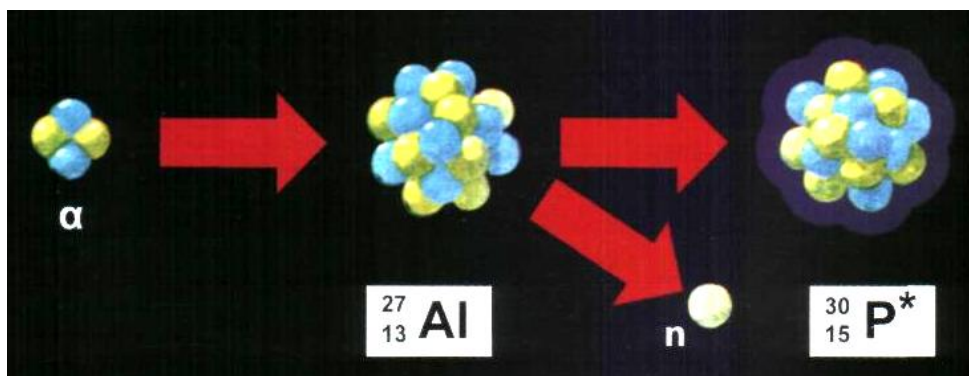


Рис. 9. Превращение алюминия в радиоактивный фосфор

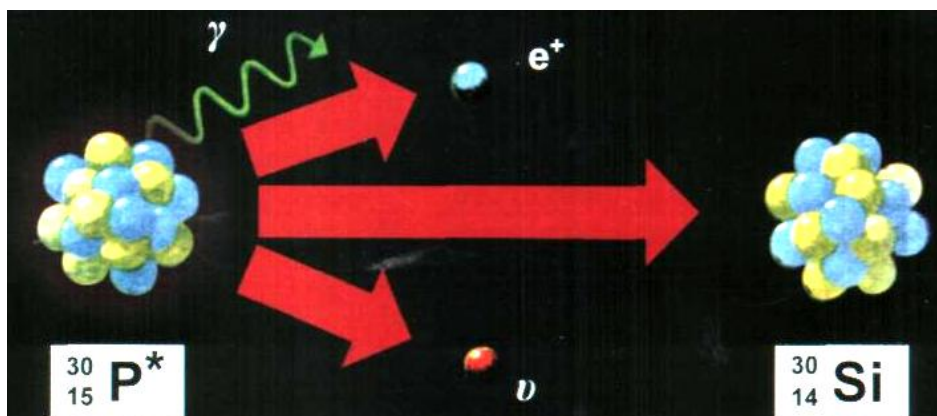


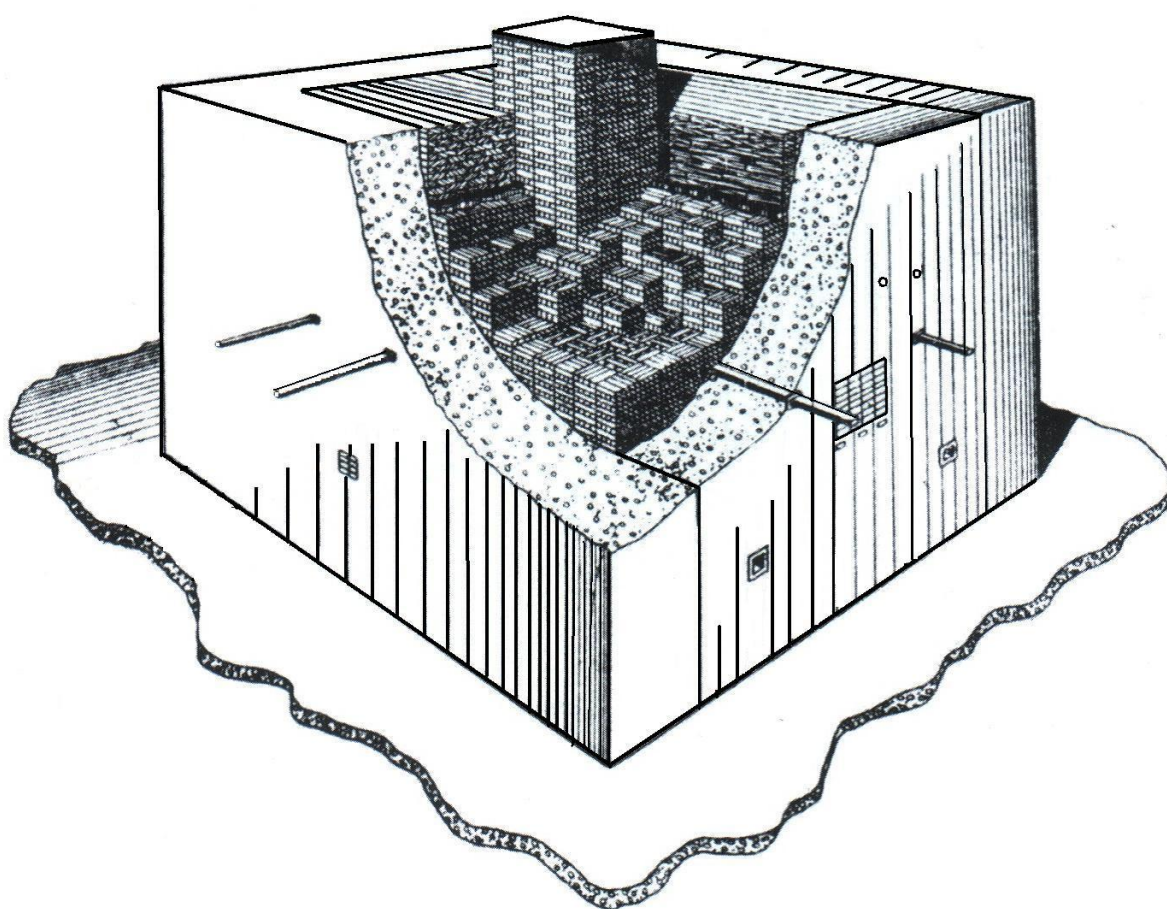
Рис. 10.  $\beta$ -распад радиоактивного фосфора и образование кремния



Рис. 11. Лизе Мейтнер (1878–1968)



*Рис. 12. Энрико Ферми (1901–1954)*



*Рис. 13. Аргоннский реактор CP-2*



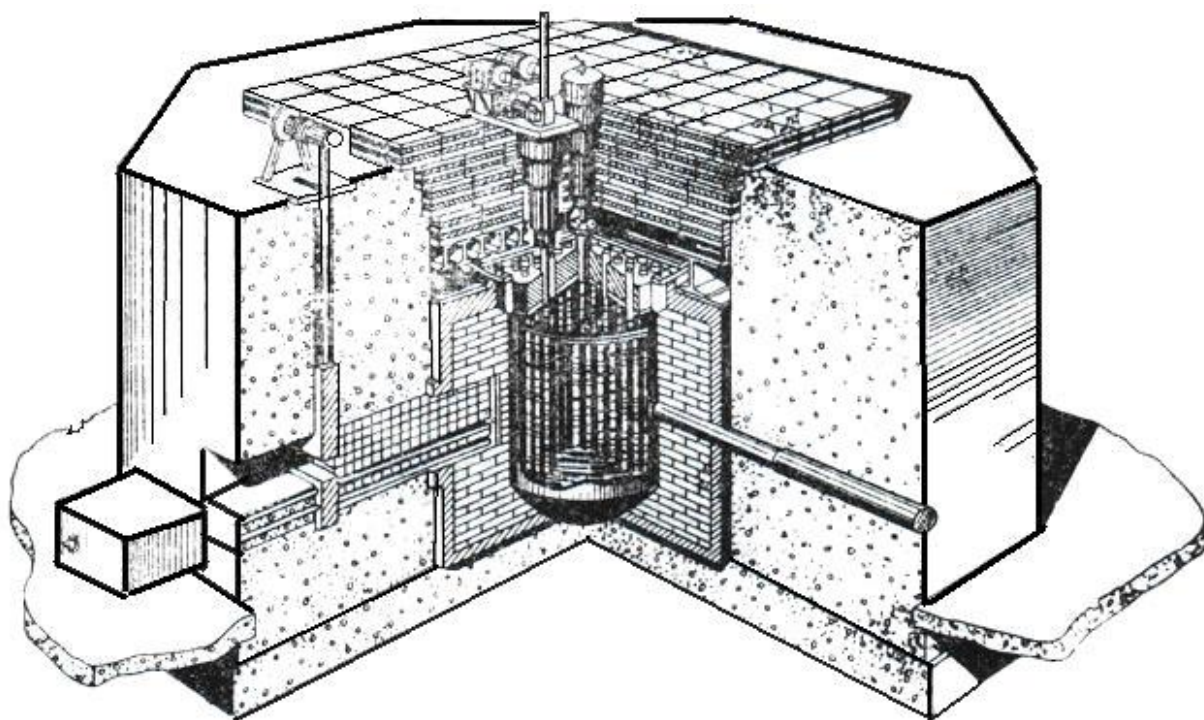


Рис. 14. Аргонный реактор СР-3

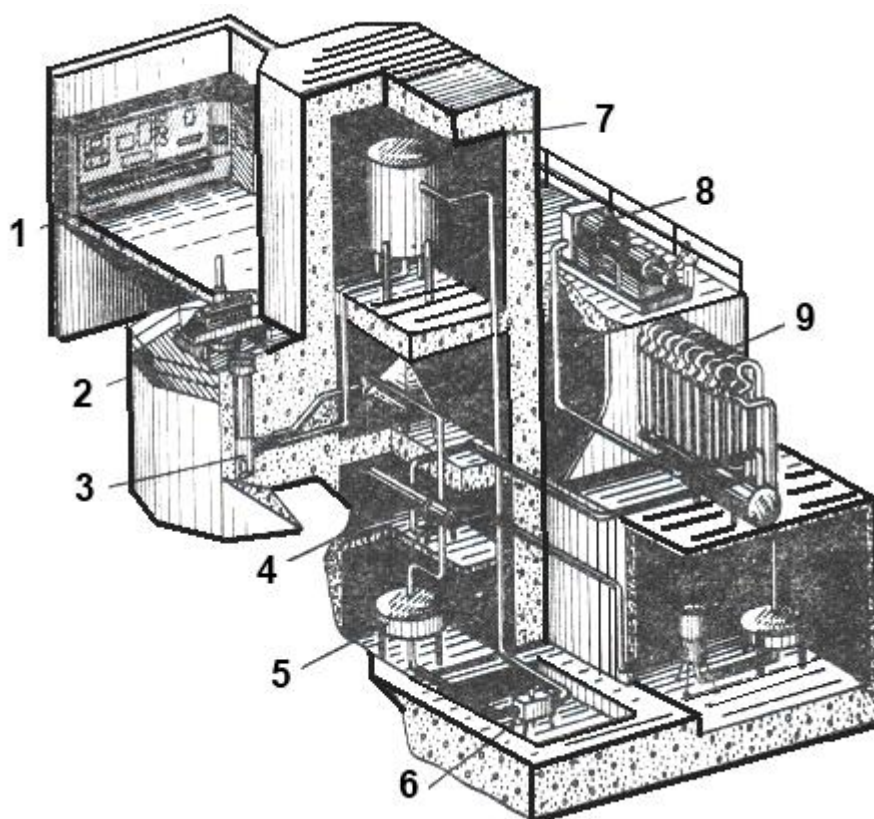


Рис. 15. Схема теплопередачи в реакторе EBR: 1 – пульт управления; 2 – защитный экран; 3 – активная зона реактора; 4 – теплообменник; 5 – приемный бак; 6 – электромагнитный насос; 7 – питающий резервуар; 8 – турбогенератор; 9 – паровой котел



*Рис. 16. Первая в мире Обнинская АЭС*



*Рис. 17. Раскрытый реактор Обнинской АЭС. Закрыта в 2002 г*



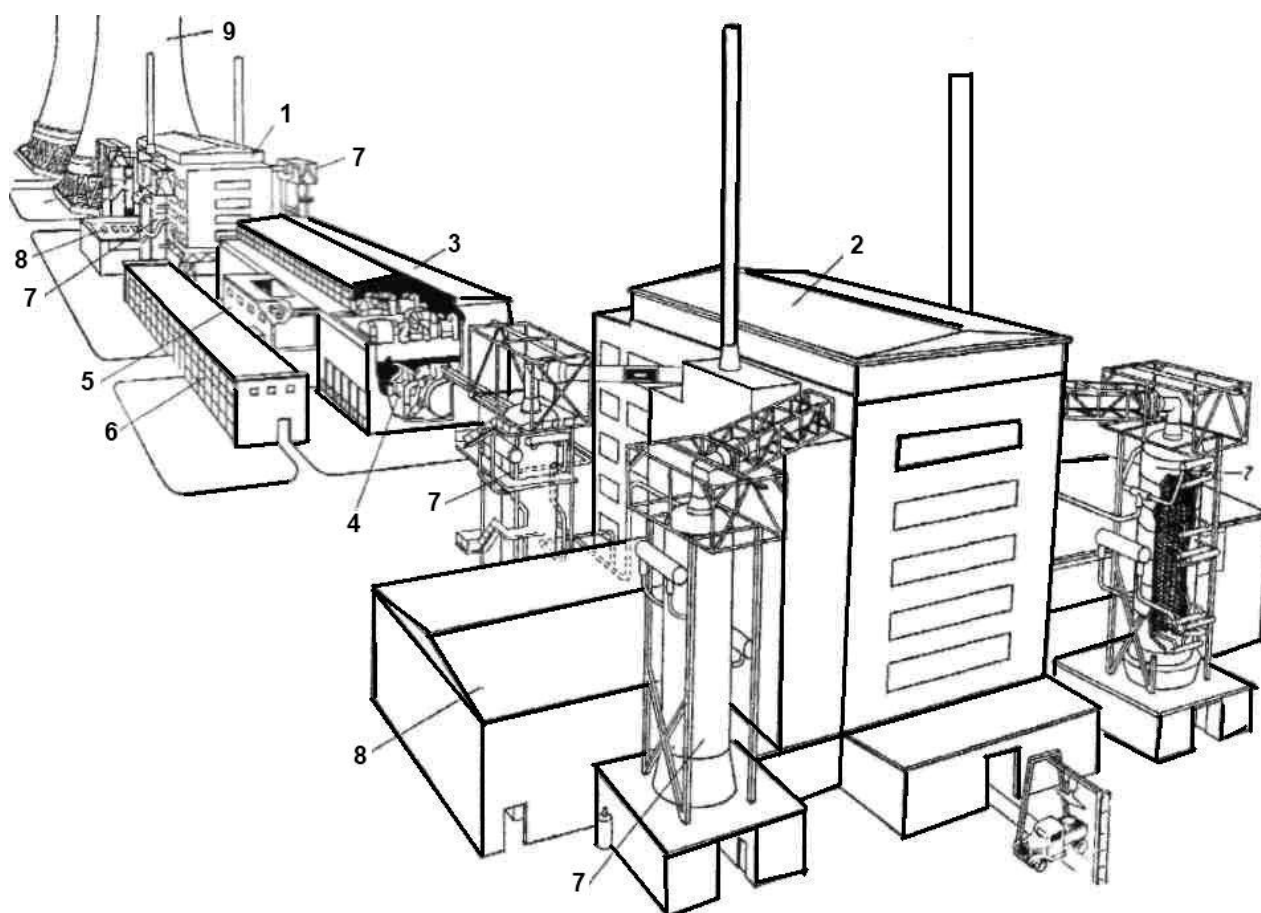


Рис. 18. Устройство атомной электростанции «Колдер-Холл»: 1 – здание реактора № 1; 2 – здание реактора № 2; 3 – турбинный зал; 4 – конденсаторы; 5 – аккумуляторы; 6 – административный корпус; 7 – теплообменники; 8 – газодувки; 9 – градирни

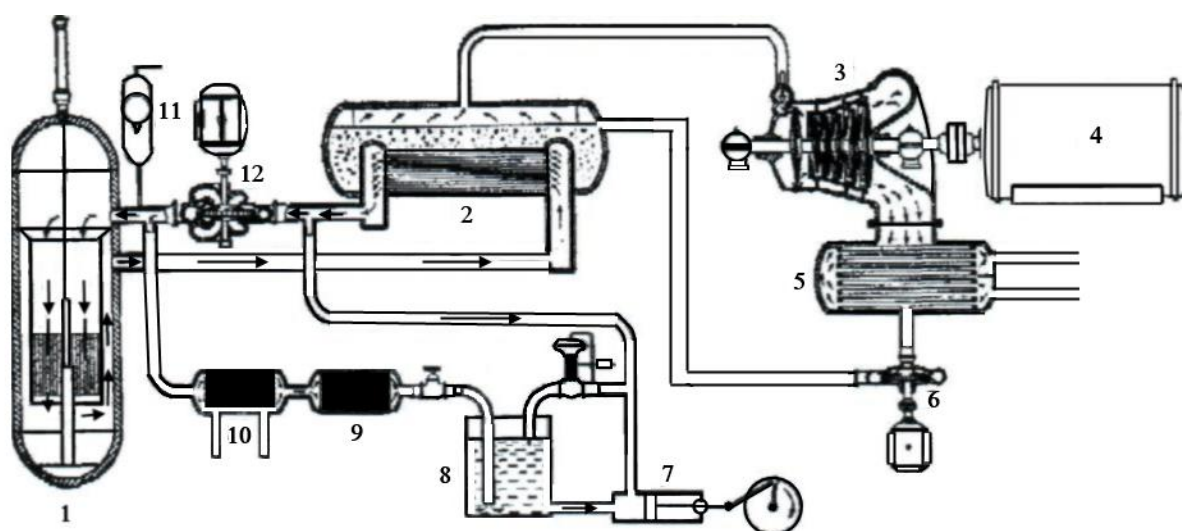


Рис. 19. Схема атомной электростанции с водяным реактором: 1 – реактор; 2 – парогенератор; 3 – турбина; 4 – электрический генератор; 5 – конденсатор; 6 – питательный насос; 7 – подпиточный насос; 8 – подпиточная емкость; 9 – фильтр; 10 – холодильник; 11 – компенсатор давления; 12 – циркуляционный насос

## ЛИТЕРАТУРА

1. Кюри М. Радиоактивность, пер. с франц., 2 изд., М.- Л., 1960;
2. Резерфорд Э. Избранные научные труды. Радиоактивность. «Наука».:М.- 1971.-432с.
3. Резерфорд Э. Избранные научные труды. Строение атома и искусственное превращение элементов. «Наука».:М.-1972.-532с
4. Мурин А. Н., Введение в радиоактивность, Л., 1955;
5. Давыдов А. С., Теория атомного ядра, М., 1958;
6. Гайсинский М. Н., Ядерная химия и ее приложения, пер. с франц., М., 1961;
7. Экспериментальная ядерная физика, под ред. Э. Сегре, пер. с англ., т. 3, М., 1961;
8. Учение о радиоактивности. История и современность, М., 1973.

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ



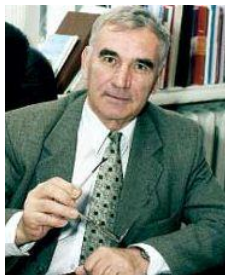
**Азаренков Николай Алексеевич** – академик НАНУ, доктор физико-математических наук, профессор. Заслуженный деятель науки и техники Украины. Научные интересы – физика плазмы и конденсированных сред, вакуумно-плазменные технологии. Лауреат премии НАНУ им. К.Д. Синельникова.



**Кириченко Валерий Григорьевич** – кандидат физико-математических наук, доцент. Научные интересы – физика твердого тела, физика сверхтонких взаимодействий, радиационное материаловедение, наноматериалы и нанотехнологии.



**Булавин Леонид Анатольевич** – академик НАНУ, академик АН ВШ Украины, доктор физико-математических наук, профессор. Создал научную школу нейтронной спектроскопии конденсированных сред. Член ассоциации деканов Европы. Заслуженный деятель науки и техники Украины.



**Неклюдов Иван Матвеевич** – академик НАНУ, академик-секретарь Отделения ядерной физики и энергетики НАНУ, доктор физико-математических наук, профессор. Создал научные школы физики радиационных явлений, физики прочности и пластичности материалов, радиационного материаловедения и физики твердого тела. Заслуженный деятель науки и техники Украины



**Залюбовский Илья Иванович** – член-корреспондент НАНУ, доктор физико-математических наук, профессор. Создал научную школу ядерной физики. Заслуженный деятель науки и техники Украины. Дважды лауреат Государственной премии Украины.



**Шиляев Борис Александрович** – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник ННЦ «ХФТИ». Научные интересы – физика радиационных явлений и физика ядерных реакторов