

50X1-HUM

PROCESSING COPY

INFORMATION REPORT INFORMATION REPORT

CENTRAL INTELLIGENCE AGENCY

This material contains information affecting the National Defense of the United States within the meaning of the Espionage Laws, Title 18, U.S.C. Secs. 793 and 794, the transmission or revelation of which in any manner to an unauthorized person is prohibited by law.

S-E-C-R-E-T

50X1-HUM

COUNTRY	USSR	REPORT	
SUBJECT	Soviet Book on Uses of Nuclear Energy	DATE DISTR.	7 March 1958
		NO. PAGES	1
		REFERENCES	RD 50X1-HUM

DATE OF INFO.	
PLACE & DATE ACQ.	

SOURCE EVALUATIONS ARE DEFINITIVE. APPRAISAL OF CONTENT IS TENTATIVE.

Russian-language book

50X1-HUM

Atomic Energy and Means for Its Practical Application (Atomnaya Energiya i Puti eye Prakticheskogo Ispolzovaniya), 279 pages, by Engineer-Col. Prof. Konstantin Vasilyevich Astakhov, published in 1957 by the Second Printing Office i/n K. Ye. Voroshilov', Directorate for Military Publishing, Ministry of Defense, USSR. The book is a collection of lectures and speeches which were presented by the author on various occasions, and attempts to explain the relationship between various phenomena which occur in the atom and the molecule. The book was compiled with the assistance and advice of Professor B.B. Kudryavtsev and M.B. Neyman.

2. The book is UNCLASSIFIED when detached from the covering report.

Distribution of Attachment:

	50X1-HUM
OSI: Loan	50X1-HUM

S-E-C-R-E-T

STATE	X	ARMY	X	NAVY	X	AIR	X	FBI		AEC							
(Note: Washington distribution indicated by "X"; Field distribution by "#")																	

50X1-HUM

INFORMATION REPORT INFORMATION REPORT



АТОМНАЯ ЭНЕРГИЯ И ПУТИ ЕЕ ПРАКТИЧЕСКОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ

К. В. АСТАХОВ

инженер-полковник профессор

АТОМНАЯ ЭНЕРГИЯ
И ПУТИ ЕЕ ПРАКТИЧЕСКОГО
ИСПОЛЬЗОВАНИЯ

ВОЕННОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
МИНИСТЕРСТВА ОБОРОНЫ СОЮЗА ССР
Москва — 1957

К ЧИТАТЕЛЯМ

Военное издательство просит присылать свои отзывы и замечания на эту книгу по адресу: Москва, 104, Тверской бульвар 18, Управление Военного издательства

Константин Васильевич Астахов,
инженер-полковник профессор
«Атомная энергия и пути ее практического использования»
Редактор профессор доктор химических наук М. Б. Нейман
Редактор издательства Я. М. Кадер
Консультанг издательства профессор доктор химических наук
Б. Б. Кудрявцев
Художественный редактор Голикова А. М.
Обложка художника Иванова Б. С.
Технический редактор Коновалова Е. К.
Корректор Преображенская И. И.

Слано в лабор 8.12.56 Подписано к печати 27.4.57.
Формат бумаги 70×92¹/₃₂ — 8¹/₄, п. л. = 10,238 усл. печ. л. + 1 вкл. —
1/8 печ. л. = 0,146 усл. печ. л. 10,872 уч.-изд. л.

Г-31504

Военное Издательство Министерства Обороны Союза ССР
Москва, Тверской бульвар, 18
Изд. № 1/7175 Зак. № 563

2-я типография имени К. Е. Ворошилова
Управления Военного Издательства Министерства Обороны Союза ССР
Ленинград — Центр-1, Дворцовая пл., 10
Цена 4 р. 25 к.



ВВЕДЕНИЕ

Отличительная черта нашей эпохи — небывало бурное развитие техники, основанное на выдающихся достижениях научной мысли. Если XIX век был по преимуществу веком пара, то XX век — век электричества — начинает все больше превращаться в век атомной энергии.

Выведенное в качестве догадки философами древности учение об атомах было разработано как научная гипотеза Рене Декартом, Пьером Гассенди и другими учеными. Основы атомно-молекулярной теории строения материи были разработаны великим русским ученым М. В. Ломоносовым. Огромную роль в последующем развитии науки о строении материи сыграли периодический закон Д. И. Менделеева и теория химического строения А. М. Бутлерова.

Советские ученые воздают должное трудам Вильгельма Рентгена, Джозефа Томсона, Анри Беккереля, Пьера Кюри, Марии Кюри-Склодовской, Альберта Эйнштейна, Эрнеста Резерфорда, Нильса Бора, Поля Ланжевена, Фредерика и Ирен Жолио-Кюри, Энрико Ферми, Хидеки Юкава, Вернера Гейзенберга, Поля Дирака, Макса Планка, Вольфганга Паули, Луи де Бройля, Карла Андерсона, Эрнеста Лоуренса и других ученых, которые своим научным творчеством

внесли ценный вклад в развитие учения о строении вещества, в выяснение путей практического использования атомной энергии.

При постоянной заботе и действенной поддержке Коммунистической партии и Советского правительства наши ученые и инженеры достигли выдающихся результатов в ряде областей науки, в том числе в ядерной физике. Они в короткие сроки замечательно решили проблему использования ядерной энергии.

По использованию атомной энергии в мирных целях Советский Союз идет впереди других стран. Верное политике укрепления мира и дружбы между народами, Советское государство выступает последовательным борцом за запрещение испытаний и применения всех видов атомного и водородного оружия, за широкое использование энергии атомного ядра в мирных целях для решения народно-хозяйственных задач. В СССР работает электростанция на ядерном «топливе».

Советский народ охотно делится своими достижениями в области мирного применения атомной энергии со всеми странами, оказывает дружескую, бескорыстную помощь в этом деле другим государствам. Содействуя развитию международного сотрудничества в области использования атомной энергии в мирных целях, Советское государство показывает вдохновляющий пример служения делу мира и прогресса.

В решениях XX съезда Коммунистической партии Советского Союза намечены пути дальнейшего развития и расширения мирного использования атомной энергии. В шестой пятилетке в нашей стране будут построены атомные электростанции мощностью 2—2,5 миллиона киловатт, будет построен мощный ледокол, работающий на

4

атомном «горючем», развернутся работы по созданию других силовых установок для транспортных целей, всемерное развитие получат работы по дальнейшему использованию радиоактивных излучений в промышленности, сельском хозяйстве, медицине и в научных исследованиях.

Одни эти факты уже свидетельствуют об огромном развороте научно-исследовательской работы по вопросам теории атомного ядра, радиоактивности и действия радиоактивных излучений на различные материалы. Вопросы мирного использования атомной энергии побудили к бурному развитию новые науки, как радиационная химия, гамма-терапия и т. д.

Выставка по использованию атомной энергии в мирных целях, подготовленная советскими учеными в 1956 г. на Всесоюзной промышленной выставке в Москве, свидетельствует об исключительных успехах советской науки в деле приборостроения для мирного использования атомной энергии.

Конференция по мирному использованию атомной энергии, созванная Академией наук летом 1955 года, доклады советских ученых на международной конференции в Женеве также летом 1955 года наглядно показали, что Советский Союз идет в первых рядах по раскрытию тайн атомного ядра и использованию его энергии на благо трудящихся. Опубликованный в советской печати доклад о новом ускорителе для получения протонов с энергией 10 миллиардов электронов-вольт, построенном советскими физиками в сотрудничестве с инженерами и техниками, вселяет уверенность в мощь советской техники и быстром ее развитии на пути прогресса.

Развитие атомной техники в СССР, как и в

5

внесли ценный вклад в развитие учения о строении вещества, в выяснение путей практического использования атомной энергии.

При постоянной заботе и действенной поддержке Коммунистической партии и Советского правительства наши ученые и инженеры достигли выдающихся результатов в ряде областей науки, в том числе в ядерной физике. Они в короткие сроки замечательно решили проблему использования ядерной энергии.

По использованию атомной энергии в мирных целях Советский Союз идет впереди других стран. Верное политике укрепления мира и дружбы между народами, Советское государство выступает последовательным борцом за запрещение испытаний и применения всех видов атомного и водородного оружия, за широкое использование энергии атомного ядра в мирных целях для решения народно-хозяйственных задач. В СССР работает электростанция на ядерном «топливе».

Советский народ охотно делится своими достижениями в области мирного применения атомной энергии со всеми странами, оказывает дружескую, бескорыстную помощь в этом деле другим государствам. Содействуя развитию международного сотрудничества в области использования атомной энергии в мирных целях, Советское государство показывает вдохновляющий пример служения делу мира и прогресса.

В решениях XX съезда Коммунистической партии Советского Союза намечены пути дальнейшего развития и расширения мирного использования атомной энергии. В шестой пятилетке в нашей стране будут построены атомные электростанции мощностью 2—2,5 миллиона киловатт, будет построен мощный ледокол, работающий на

4

атомном «горючем», развернутся работы по созданию других силовых установок для транспортных целей, всемерное развитие получат работы по дальнейшему использованию радиоактивных излучений в промышленности, сельском хозяйстве, медицине и в научных исследованиях.

Одни эти факты уже свидетельствуют об огромном развороте научно-исследовательской работы по вопросам теории атомного ядра, радиоактивности и действия радиоактивных излучений на различные материалы. Вопросы мирного использования атомной энергии побудили к бурному развитию новые науки, как радиационная химия, гамма-терапия и т. д.

Выставка по использованию атомной энергии в мирных целях, подготовленная советскими учеными в 1956 г. на Всесоюзной промышленной выставке в Москве, свидетельствует об исключительных успехах советской науки в деле приборостроения для мирного использования атомной энергии.

Конференция по мирному использованию атомной энергии, созванная Академией наук летом 1955 года, доклады советских ученых на международной конференции в Женеве также летом 1955 года наглядно показали, что Советский Союз идет в первых рядах по раскрытию тайн атомного ядра и использованию его энергии на благо трудящихся. Опубликованный в советской печати доклад о новом ускорителе для получения протонов с энергией 10 миллиардов электронов-вольт, построенном советскими физиками в сотрудничестве с инженерами и техниками, вселяет уверенность в мощь советской техники и быстром ее развитии на пути прогресса.

Развитие атомной техники в СССР, как и в

5

любом другом государстве, зависит от размаха научных исследований. Успешное использование атомной энергии в мирных целях находится в прямой связи с дальнейшим развитием научных работ в области экспериментальной и теоретической физики.

Известно, что на рубеже нынешнего столетия, когда физики обнаружили сложную структуру атома, его делимость, эти открытия вызвали, по определению В. И. Ленина, новейшую революцию в естествознании. Физики стали представлять атом в виде сложной системы, состоящей из ядра и электронов. Однако составляющие атом частицы многие рассматривали как последние, не имеющие дальнейшего дробления. Руководствуясь марксистским диалектическим методом, обобщая новейшие достижения современной науки, против этих метафизических представлений выступил В. И. Ленин.

«...Если вчера, — писал Владимир Ильич о новых открытиях в физике, — это углубление не шло дальше атома, сегодня — дальше электрона и эфира, то диалектический материализм настаивает на временном, относительном, приблизительном характере всех этих *вех* познания природы прогрессирующей наукой человека. Электрон так же *неисчерпаем*, как и атом...» (том 14, стр. 249).

Еще более глубокое проникновение в недра атома позволит ученым полнее познать свойства и закономерности взаимодействия содержащихся в нем мельчайших частиц, глубже изучить природу внутриядерных сил.

До сих пор физики не знают в полной мере природы, так называемых, «элементарных» частиц. Мы далеко не достаточно знаем, какие силы действуют в атомном ядре между составляющими

его нейтронами и протонами, как эти силы связаны с пи-мезонами — «элементарными» частицами, масса каждой из которых примерно в триста раз больше массы электрона. Известно несколько типов мезонов. Они различаются по массе и ряду других свойств. Нет еще ясного представления и о том, как силы, действующие в ядре атома, связаны с тяжелыми мезонами, масса которых почти в тысячу раз больше массы электрона. Мы еще очень мало знаем о так называемых гиперонах, обладающих массой, несколько большей массы протона или нейтрона. Все эти ранее неизвестные человеку частицы являются неустойчивыми. Они распадаются, преобразуясь в другие частицы, за миллиардные доли секунды. В 1955 году ученые открыли антипротон — элементарную частицу, существование которой долго и упорно предсказывалось теоретиками. Оказывается, что эта частица, несущая, в противоположность положительно заряженному протону, отрицательный электрический заряд, взаимодействует с атомными ядрами значительно активнее, чем протон. Открытие антипротона и в 1956 году антинейтрона и дальнейшее изучение свойств античастиц имеют большое значение для развития физики «элементарных» частиц. В печати указывалось, что сейчас еще трудно предсказать, каковы могут быть практические последствия изучения мира «элементарных» частиц. Но история развития науки показывает, что когда физики углублялись в новую область, они никогда не возвращались оттуда с пустыми руками.

Советское государство располагает научными лабораториями и институтами, ведущими исследования в области ядерной физики с помощью первоклассных установок и приборов. Огромные

достижения, которых достигла советская наука в выяснении природы строения вещества и использования атомной энергии, являются залогом еще более быстрого развития народного хозяйства нашей страны и укрепления ее обороноспособности.

В последние годы появилось много книг и статей, посвященных популярному изложению проблемы использования атомной энергии, атомному оружию и его действию. Несмотря на различный характер изложения существа вопроса, в некоторых из этих книг есть то общее, что в них принципиальные основы учения об атомной энергии либо совсем не рассмотрены, либо они изложены, как полагает автор, нечетко.

Многие авторы определяют понятие «атомная энергия» следующими словами: «Энергию, освобождающуюся при превращении ядер атомов одних химических элементов в ядра атомов других химических элементов, принято называть атомной энергией». Согласно приведенному определению атомной энергией следует называть энергию, «освобождающуюся при превращении ядер атомов», и потому атомная энергия в соответствии с этим пониманием ее сути появляется на арену физических явлений только в момент превращения атомных ядер. Имея в виду это определение, нельзя говорить о запасах атомной энергии, а вместе с тем некоторые авторы утверждают, что «запасы атомной энергии велики» и что ее «высвобождение из недр атома и практическое использование связано с большими трудностями». Здесь определение явно не находится в соответствии с последующими высказываниями. Нет нужды приводить аналогичные примеры из некоторых других литературных источников.

В настоящей брошюре автор проводит мысль, которая согласуется со всеми опытными фактами, что «атомная энергия» есть энергия, заключенная в атомах, а следовательно, и в веществах, коль скоро последние построены из атомов. Едва ли есть какие-либо научные основания говорить об атомной энергии и ее использовании, как о чем-то необычном; наоборот, вопрос о частичном использовании атомной энергии давно решен путем химических реакций, например, реакций горения. В настоящий момент поставлен наукой вопрос о резком увеличении коэффициента использования атомной энергии и прежде всего, конечно, об использовании ядерной энергии, как главной части атомной энергии. Сейчас нет серьезных оснований говорить об атомной энергии как об особом виде энергии наряду с электрической, световой, кинетической и другими видами энергии. Надо иметь в виду, что даже кинетическая энергия какого-либо тела в конечном счете есть энергия движущихся электрически заряженных частиц, поскольку вещества, из которых построены все тела природы, состоят из электронов и атомных ядер. Кинетическая энергия также может быть отнесена с известной оговоркой к атомной энергии. Кинетическая энергия тела в той или иной мере по своему существу тесно связана с электрической энергией и, как уже отмечено, с атомной энергией.

Аналогичные замечания можно сделать и по поводу энергии движущихся фотонов и световой энергии, а последняя в соответствии с электромагнитной теорией света непосредственно связана с электрической и магнитной энергиями.

Вообще говоря, в связи с проблемами практического использования ядерной энергии назрел

важный вопрос в естествознании о понятии вид энергии.

Поскольку энергия атомных ядер — ядерная энергия — является главной частью атомной энергии и в настоящее время под фразой «практическое использование атомной энергии» понимают использование ядерной энергии, то наша брошюра и посвящена вопросу о путях практического использования ядерной энергии; в ней лишь попутно, в связи с основной задачей, рассмотрено явление радиоактивности, характеристика альфа-, бета- и гамма-лучей.

Вместе с тем надо отметить, что, стремясь к популяризации изложения основной задачи, автор этой брошюры избегал, с одной стороны, детализации, а с другой — широкой всеобъемлющей трактовки проблемы. Конечно, в брошюре ряд важных вопросов не изложен во всей их полноте с глубоким анализом явления. Автор стремился лишь к выявлению принципиальных основ учения о путях практического использования ядерной энергии, т. е. установить непосредственную связь между основными понятиями естествознания — материя и энергия, и основными законами — законом вечности материи и законом сохранения энергии с конкретными методами использования ядерной энергии. Автор стремился показать, что в свете основных законов естествознания вопрос об использовании ядерной энергии приобретает ясность и наглядность.

Настоящая брошюра является несколько расширенным текстом общедоступных лекций, которые читал автор в различных аудиториях. Как в этой брошюре, так и в своих лекциях автор преследовал цель раскрытия взаимосвязи между различными явлениями, происходящими в мире

10

атомов и молекул. Он хотел, чтобы в брошюре красной нитью проходила мысль о неизменной подчиненности всех явлений природы основным законам естествознания: закону вечности материи и закону сохранения энергии. Поэтому все изложение содержания брошюры выполнено в такой последовательности, чтобы при переходе от более простых понятий к более сложным, от рассмотрения макроявлений к разбору микроявлений (то есть явлений в атомах) отчетливо выявлялись эти два основных закона природы. В какой мере это удалось, автору трудно судить; во всяком случае, он заранее приносит благодарность читателям, которые найдут в брошюре те или иные недостатки и сообщат свои отзывы и замечания. Автор пользуется здесь случаем выразить благодарность проф. Б. Б. Кудрявцеву и проф. М. Б. Нейману, согласившимся прочитать рукопись и сделавшим ряд замечаний и указаний об изменении текста рукописи.





1. МАТЕРИЯ И ЭНЕРГИЯ

Наблюдения предметов внешнего мира давно привели людей к признанию, точнее к полной уверенности в их объективном существовании; это означает, что предметы существуют вне зависимости от того, ощущают ли непосредственно их люди или нет. Наличие общих свойств у различных предметов, например у яблока, камня, стула — протяженности (т. е. свойства занимать пространство), массы и т. д. — привело к мысли о том, что все предметы построены из единой сущности — материи, многообразной в своих проявлениях.

Материалистическое мировоззрение исходит из того, что мир по своей природе материален, что все то огромное многообразие окружающих нас предметов и явлений — от мельчайшей пылинки до гигантских звезд, от мельчайшего простейшего живого существа — вируса до такого сложного живого организма, как человек — все представляет собой не что иное, как различные виды движущейся материи. Наука доказывает, что материя бесконечна и вечна. Это значит, что мир, окружающий нас, не имеет никаких границ; нет ему ни конца, ни края; он никогда не был сотворен, а всегда существовал и будет существовать.

А что такое материя? Замечательное по своей глубине и полноте определение материи дано В. И. Лениным в произведении «Материализм и эмпириокритицизм». «Материя, — пишет В. И. Ленин, — есть философская категория для обозначения объективной реальности, которая дана человеку в ощущениях его, которая копируется, фотографируется, отображается нашими ощущениями, существуя независимо от них». В ленинском определении материи выражены наиболее общие свойства всех вещей, всей природы: они существуют независимо от сознания, они могут нами ощущаться. Из факта объективного существования предметов следует объективность существования материи, поэтому материя является объективной реальностью, данной нам в ощущениях.

Наблюдая различные предметы, мы не можем не заметить наличия в них тех или иных изменений; некоторые эти изменения вызваны внешними причинами по отношению к предметам; так, если ударить молотком по стакану, то стакан разобьется на отдельные куски. Однако в предметах могут происходить изменения, не вызванные внешними причинами. Так, например, в ряде случаев удается наблюдать, как стакан лопается и разваливается на куски без видимых внешних воздействий. Часто эти изменения даже вызывают впечатление «случайности» этих изменений. Иногда изменения в теле столь мало проявляют себя, что они не могут быть обнаружены даже с помощью специальных приборов, например, микроскопа. Но так или иначе все тела с течением времени претерпевают заметные или мало заметные изменения. Очевидно, что эти изменения являются следствием тех причин, которые присущи самим телам или предметам. Совер-

Шенно ясно, что эти изменения происходят с той сущностью, из которой состоят предметы, или, как мы выше сказали, с материей, из которой построены все тела мира. Коль скоро во всяком предмете имеют место изменения, то очевидно, в материи происходят все время какие-то процессы, или, как говорят философы, материя всегда находится в движении. Эти изменения, или движения материи, могут проявлять себя по-разному. Так, например, если тело светится, то такое движение материи можно назвать световым, если предмет перемещается в пространстве с некоторой скоростью, то это означает, что материя находится в состоянии механического движения, и т. д. Таким образом, движения материи могут быть механическими, световыми, электрическими, магнитными и т. д. Форму движения материи называют энергией, и в соответствии с существованием различных форм движения материи в науке различают виды энергии: кинетическую (энергию механического движения), световую, электрическую, магнитную и т. д.

Из всего сказанного следует чрезвычайно важное положение, что материи всегда присуща энергия и что энергия не может быть без материального носителя; в этом смысле энергия материальна. Итак, материя не может быть без энергии, энергия не может быть без материи. Из того факта, что материя всегда должна обладать энергией, следует невозможность отнятия у нее всей свойственной ей энергии.

Часто можно слышать, что Солнце излучает огромное количество энергии; имея в виду все сказанное выше, мы должны тотчас же представить себе существование того материального носителя, с которым Солнце отдает свою энергию.

14

Этим носителем является свет, который, как это сейчас стало совершенно достоверным, состоит из частиц называемых фотонами. Таким образом, фотоны являются материальными носителями световой энергии, поэтому Солнце, излучая фотоны, тем самым излучает и энергию, уносимую этими фотонами. В вопросах использования атомной энергии особую важность и особый смысл приобретает высказанное выше положение, что энергия не отделима от материи, материя не может быть без энергии.

2. ОСНОВНЫЕ ЗАКОНЫ ЕСТЕСТВОЗНАНИЯ

Наблюдая процессы, протекающие в природе или в лабораториях мы замечаем, что материя может менять вид своего существования. Так, например, каменный уголь, брошенный в топку парового котла, сгорает и вместо него появляются продукты сгорания: углекислый газ, окись углерода, водяной пар. В данном случае материя, из которой состоял каменный уголь, перешла в углекислый газ, окись углерода и водяной пар; материя изменила в процессе сгорания вид своего существования.

Что же касается энергии, которая была присутствующая в каменном угле и содержалась в нем в скрытом виде, как говорят, в потенциальной форме, то и она перешла в продукты сгорания, которые благодаря этому уже имеют иную, более высокую температуру. От продуктов сгорания энергия в дальнейшем перейдет в воду в паровом котле, затем в пар, из которого уже она с помощью паровой машины или паровой турбины преобразуется в кинетическую энергию (например, паровоза) или же преобразуется в электри-

15

ческую энергию и уж затем в кинетическую энергию движущихся тел. Таким образом, энергия от одного тела может передаваться другому или же преобразовываться в другие виды энергии. Следовательно, энергия как форма движения материи может менять своего материального носителя.

Детальное изучение процессов превращения различных видов существования материи друг в друга, а также превращения различных видов энергии друг в друга привело к открытию двух основных законов естествознания: закона вечности материи и закона сохранения энергии. Первый из этих законов утверждает, что материя не исчезает и не появляется из ничего; она может менять только вид своего существования. Второй закон говорит о том, что энергия не исчезает и не появляется из ничего, она также может только изменять свой вид.

Эти два закона, по мнению бывшего президента Академии наук С. И. Вавилова, в отчетливой форме высказал М. В. Ломоносов. В 1748 г. в письме к Эйлеру, знаменитому Петербургскому математику, Ломоносов писал: «Все перемены в Nature случающиеся такого суть состояния, что сколько чего у одного тела отнимается, столько присовокупится к другому. Так, ежели где убудет несколько материи, то умножится в другом месте... Сей всеобщей естественной закон простирается и в самые правила движения: ибо тело, движущее своей силою другое, столько же оная у себя теряет, сколько сообщает другому, которое от него движение получает...» Рассматривая первую часть высказывания Ломоносова, легко видеть, что она является формулировкой закона вечности материи «...где убудет несколько мате-

16

рии, то умножится в другом месте». Вторая часть, несомненно, может считаться формулировкой закона сохранения энергии. Ломоносов не мог использовать слова «энергия», ибо этого слова еще в XVIII веке и не существовало, но мысль Ломоносова выражает по существу закон сохранения энергии.

Эти два закона естествознания советские ученые по почину бывшего президента Академии наук С. И. Вавилова объединяют, называя их законом сохранения Ломоносова. В свете этих двух законов естествознания кажутся совершенно нелепыми утверждения некоторых зарубежных исследователей о возможности превращения материи в энергию и обратно — материализации энергии, то есть ее превращения в материю.

Прежде всего необходимо кратко остановиться на понятии выделение энергии. Как уже говорилось выше, всякому телу присуще то или иное количество энергии даже в том случае, если тело по внешним признакам находится в покое; это количество энергии можно назвать энергией покоя, или потенциальной, то есть скрытой энергией. Одновременно здесь отметим, что массу покоящегося тела называют массой покоя. Если тело из состояния покоя приходит под действием внешнего на него воздействия в движение, то есть приобретает некоторую скорость, то, как говорят, оно приобрело кинетическую энергию, которая измеряется величиной $\frac{mv^2}{2}$, где m — масса тела и v — его скорость.

В движущемся теле его полная энергия состоит из энергии покоя — потенциальной энергии — и кинетической энергии $\frac{mv^2}{2}$. В ряде слу-

2—563

17

чаев потенциальная энергия тела может проявить себя в том, что она под воздействием ничтожного по своей значимости толчка превращается в кинетическую энергию. Так, например, взрывчатое вещество под влиянием удара или детонации разрушается, и продукты его разрушения имеют значительную кинетическую энергию, что вызывает образование ударной волны и может повлечь за собой те или иные механические разрушения. В данном случае принято говорить о выделении энергии. Следовательно, в рассмотренном примере словами выделение энергии обозначают преобразование энергии из скрытой, потенциальной формы в форму кинетическую. При взрыве весьма часто имеет место свечение продуктов разрушения взрывчатых веществ или образование света в момент самого разрушения этого вещества. Излучение света также называют выделением энергии. По существу это выделение энергии означает преобразование скрытой, потенциальной энергии взрывчатого вещества в световую энергию, которую несут с собой материальные частицы света — фотоны. Итак, выделением энергии часто называют преобразование потенциальной энергии тела в кинетическую и световую энергии. Конечно, эти последние имеют своих материальных носителей, кинетическую энергию несут продукты разрушения взрывчатого вещества, световую энергию несут фотоны — частицы света.

Учитывая превращения различных видов энергии друг в друга и закон сохранения энергии, легко увидеть, что между видами энергии должна существовать эквивалентность, то есть одно и то же количество энергии должно выражаться в различных ее видах различными численными вели-

чинами. Чтобы это было понятно, рассмотрим вопрос о формах переноса энергии от одного тела к другому. Изучение переноса энергии привело к убеждению о существовании двух таких форм, именно: работы и теплоты.

Поднимая камень на некоторую высоту, мы выполняем работу, то есть приложив к камню некоторую силу, мы преодолеваем сопротивление силы притяжения земли и тем самым увеличиваем энергию камня; его энергия на некоторой высоте от уровня земли больше, чем его энергия на уровне земли. Следовательно, выполняя работу поднятия камня, человек свою энергию передает камню, и, таким образом, работа, являясь произведением силы на пройденный путь, есть форма передачи энергии от одного тела, в данном случае человека, другому телу — камню. Легко показать, что количество переданной энергии численно равно выполненной работе. Таким образом, всякий раз, когда идет речь о передаче энергии в виде работы, можно ее представить в виде произведения силы, приложенной к телу, на пройденный телом путь, и эта работа численно равна количеству перенесенной энергии.

Другой формой передачи энергии является теплота. Эта форма в отличие от первой не может быть представлена произведением силы на пройденный путь. Она имеет место либо при непосредственном контакте двух тел, например, тела более горячего и тела более холодного; или же перенос энергии от тела с высокой температурой к телу с низкой температурой происходит вне зависимости от того, имеется ли между ними непосредственный контакт или нет. В этом случае перенос энергии осуществляется световым излучением, понимая под последним поток фотонов.

В свете сказанного количество энергии, переданное от одного тела к другому в форме теплоты, можно назвать количеством теплоты; более того, теплоту можно рассматривать и как энергию в момент ее перехода от одного тела к другому. Таким образом, используемое иногда понятие тепловая энергия как вид энергии не имеет экспериментального и теоретического обоснования, и в серьезной научной литературе термин тепловая энергия перестал находить себе применение.

Имея в виду все сказанное, можно теперь обратиться к вопросу об эквивалентности различных форм энергии, для чего необходимо рассмотреть важнейшие единицы измерения количества энергии.

Единица измерения механической энергии — эрг

В качестве единицы измерения механической энергии принят эрг, равный работе силы в одну дину на пути в один сантиметр. Дина же является силой, которая, будучи приложена к телу с массой в один грамм, обуславливает у него изменение скорости на один сантиметр в одну секунду.

Чтобы проиллюстрировать величину одного эрга, достаточно привести такой пример: если камень с массой в один грамм поднять на высоту один метр над уровнем земли, то для этого поднятия необходимо выполнить работу 98 100 эргов, и, следовательно, его энергия на этой высоте больше на $98\,100 = 9,81 \cdot 10^4$ эргов, чем на уровне земли. Таким образом, видим, что величина эрг сравнительно очень невелика. Работа в один килограммометр равна $9,81 \cdot 10^7$ эргов, то есть равна девяноста восьми миллионам ста тысячам эргов.

20

Единица измерения энергии, применяемая в атомной физике, — мегаэлектронвольт

Как известно, наименьшей частицей отрицательного электричества является электрон; электрон — материальная частица с массой покоя, равной $9,0 \cdot 10^{-28}$ грамма, то есть $0,000000000000000000000000000009$ г; диаметр электрона, если последний рассматривать как шарик, равен 10^{-13} см; электрический заряд электрона равен $1,6 \cdot 10^{-19}$ кулона. Наглядное представление о кулоне может дать такое сопоставление: электрический ток в один ампер означает протекание электрического заряда в один кулон через сечение проводника в одну секунду.

В качестве единицы измерения энергии применяется мегаэлектронвольт (Мэв). Этой величиной называют ту энергию, которую приобретает электрон, пробежав в постоянном электрическом поле разность потенциалов в один миллион вольт. Электрическим полем называют особый вид материи, окружающей всякий электрический заряд; электрическое поле возникает и между двумя электродами, один из которых должен быть положительным (анод), а другой отрицательным (катод). Поскольку электрическое поле является материей, а материя всегда присуща некоторое количество энергии, то и электрическое поле обладает энергией. Электрон, попавший в постоянное электрическое поле, испытывает с его стороны силу, постоянную по величине и заставляющую его двигаться к положительному электроду. Электрическое поле совершает работу перемещения электрона, в результате чего энергия поля переплощается в кинетическую энергию электрона. Так, если электрон имеет энергию 0,05 Мэв, то он

21

имеет скорость $130\,000 \frac{\text{км}}{\text{сек}}$; если же его энергия увеличится до 0,1 Мэв, то скорость возрастет до величины $190\,000 \frac{\text{км}}{\text{сек}}$. Чтобы иметь представление о величине 1 Мэв, сравним ее с одним эргом. Оказывается, 1 Мэв равен $1,6 \cdot 10^{-6}$ эрга.

Единица измерения энергии, применяемая для измерения энергии тел, — калория

Как упоминалось выше, непосредственный перенос энергии от одного тела к другому при их контакте имеет место при наличии разности температур обоих тел. То количество энергии, которое нужно сообщить одному грамму жидкой воды, чтобы поднять температуру на один градус от температуры $15,5$ до $16,5^\circ$, называют малой калорией; величину, в тысячу раз большую, называют большой калорией.

Измерения показали, что одна калория равна $2,612 \cdot 10^{13}$ Мэв и, кроме того, она равна $4,18 \cdot 10^7$ эргов. На основании всех приведенных данных можно составить таблицу для пересчета того или иного количества энергии в тех или иных единицах. 1 Мэв = $1,6 \cdot 10^{-6}$ эрга; 1 эрг = $6,25 \cdot 10^5$ Мэв; 1 кал = $2,612 \cdot 10^{13}$ Мэв; 1 Мэв = $3,83 \cdot 10^{-14}$ кал; 1 эрг = $2,39 \cdot 10^{-8}$ кал; 1 кал = $4,18 \cdot 10^7$ эргов.

3. КОЛИЧЕСТВО ЭНЕРГИИ В ТОМ ИЛИ ИНОМ ТЕЛЕ И ПОНЯТИЕ АТОМНАЯ ЭНЕРГИЯ

Выше указывалось, что всякое тело, или предмет, обладает некоторым количеством энергии. Возникает вопрос: каково это количество энер-

22

гии? Ответ на этот вопрос дает известное соотношение А. Эйнштейна между энергией (E) и массой тела (m)

$$E = mc^2,$$

где c — скорость распространения света в вакууме, величина постоянная, не зависящая ни от каких факторов и равная $2,99776 \cdot 10^{10}$ см/сек. Приближенно и вместе с тем достаточно точно эта величина может быть принята равной $3 \cdot 10^{10}$ см/сек, то есть скорость распространения света равна тремстам тысячам километров в одну секунду. Это соотношение впервые установлено Эйнштейном и носит его имя; весьма часто его неправильно называют законом эквивалентности материи и энергии, или законом эквивалентности массы и энергии. Неправильность таких названий видна из того, что материя и энергия по самому своему существу не могут быть эквивалентными; то же самое можно сказать и о массе и энергии.

Соотношение $E = mc^2$ было проверено на многих объектах, изучаемых атомной физикой, и для всех проведенных опытов оно оказалось безупречным. Величина E охватывает собой все виды энергии, которые свойственны тому или иному телу. Это обстоятельство имеет большое принципиальное значение; так как оно подчеркивает общность всех видов энергии; кроме того, это соотношение оказалось применимым к самым различным объектам, к электрону, фотону и т. д. Поскольку величина c^2 является всегда постоянной, то всякое изменение энергии тела неминуемо влечет за собой соответствующее изменение его массы; поэтому количество энергии в теле может быть оценено величиной его массы.

Не представляется странным утверждение, что

23

Солнце ежеминутно излучает количество энергии, равное $250 \cdot 10^6$ тоннам.

Если тому или иному телу будет придано некоторое количество энергии, то соответственно увеличится и масса тела. Так, движущийся электрон имеет большую массу, чем покоящийся; горячее тело имеет большую массу, чем то же тело с меньшей температурой. Если заставить то или иное тело, первоначально покоящееся, двигаться с некоторой скоростью, то его энергия E с достаточной точностью будет равна сумме энергии покоящегося тела E_0 и его кинетической энергии ΔE

$$E = E_0 + \Delta E.$$

Соответственно масса движущегося тела равна сумме массы покоящегося тела m_0 и прироста массы Δm , обусловленной наличием кинетической энергии у тела $m = m_0 + \Delta m$; умножив последнее выражение на c^2 , мы получим

$$mc^2 = m_0c^2 + c^2\Delta m.$$

Если иметь в виду, что $mc^2 = E$, $m_0c^2 = E_0$, то, очевидно,

$$c^2\Delta m = \Delta E.$$

и, следовательно, прирост массы Δm , обусловленный наличием у тела кинетической энергии, равен

$$\Delta m = \frac{\Delta E}{c^2}.$$

Поскольку в знаменателе правой части равенства стоит скорость распространения света, возведенная в квадрат, то есть $(3 \cdot 10^{10})^2 = 9 \cdot 10^{20}$, то величина Δm обычно ничтожно мала, в нашей жизни скорости тел чрезвычайно малы по сравнению со скоростью распространения света. Поэтому для процессов в «обыденной жизни

можно совершенно не считаться с изменением массы при приобретении телом кинетической энергии. В атомной физике изучаются такие явления, когда те или иные частицы (например, электроны) могут иметь громадные скорости, близкие к скорости распространения света. В этом случае, очевидно, нельзя пренебрегать изменением массы тела, обусловленного движением тела.

Во всяком случае масса тела, как это следует из соотношения $E = mc^2$, может рассматриваться, с одной стороны, как такое свойство тела, которое своим истоком имеет энергию тела и является результатом ее проявления, а с другой стороны, как мера количества энергии. Поэтому, воспользовавшись этим соотношением, можно оценить то количество энергии, которым обладает рассматриваемое тело. Надо иметь в виду применимость этого соотношения ко всем телам, и потому один грамм железа, один грамм золота, один грамм песка и любое другое тело с массой в один грамм имеет одно и то же количество энергии. Чтобы оценить это количество, достаточно в соотношение $E = mc^2$ поставить вместо m единицу, а вместо c $3 \cdot 10^{10}$ (точнее $2,99776 \cdot 10^{10}$), и тогда энергия тела с массой в один грамм выразится следующим числом: $E = 1 \cdot (3 \cdot 10^{10})^2 = 9 \cdot 10^{20}$ эргов. Таким образом, тело с массой в один грамм обладает энергией $9 \cdot 10^{20}$ эргов, отсюда следует возможность измерять количество энергии в единицах массы; на основании сказанного можно составить таблицу единиц измерения энергии.

$$\begin{array}{ll} 1 \text{ г} = 9 \cdot 10^{20} \text{ эргов} & 1 \text{ эрг} = 1,1 \cdot 10^{-21} \text{ г} \\ 1 \text{ г} = 56,25 \cdot 10^{25} \text{ Мэв} & 1 \text{ Мэв} = 1,78 \cdot 10^{-27} \text{ г} \\ 1 \text{ г} = 2,15 \cdot 10^{13} \text{ кал} & 1 \text{ кал} = 4,65 \cdot 10^{-14} \text{ г} \end{array}$$

Приведенные в таблице данные позволяют понять, почему можно считать массу неизменной при нагревании того или иного тела. Так, для нагревания одного килограмма воды от 0° до 100° требуется 100 000 кал. Следовательно, некоторое количество воды, имея массу в один килограмм при температуре 0°, должно иметь массу при 100°, равную $1000 + 100\,000 \cdot 4,65 \cdot 10^{-14} = 1000 + 4,65 \cdot 10^{-9}$ г. Очевидно, масса увеличилась при нагревании от 0° до 100° одного килограмма воды столь незначительно (на $4,65 \cdot 10^{-9}$ г), что с этим увеличением нет смысла считаться.

Итак, любое тело с массой в один грамм обладает энергией, измеряемой следующими величинами $9 \cdot 10^{20}$ эргов, или $2,15 \cdot 10^{13}$ кал. Если принять, что при сгорании одного грамма каменного угля выделяется энергии 7000 кал, то для выделения $2,15 \cdot 10^{13}$ кал необходимо сжечь $2,15 \cdot 10^{13} : 7000 = 3,10^9$ г каменного угля, то есть $3 \cdot 10^3$ тонн. Таким образом, любое тело с массой в один грамм содержит столько энергии, сколько ее выделится при сгорании 3000 тонн каменного угля, то есть такого количества угля, которое доставляют два тяжелых товарных поездных состава (рис. 1).

Бабушка купила внучке яблоко массой в 200 г, ведь ни бабушка, ни тем более внучка не думают, что в этом яблоке содержится такое количество энергии, которое может выделиться при сгорании 600 000 тонн каменного угля...

Булыжник, лежащий на мостовой, массой в один килограмм и один килограмм картофеля, купленный домашней хозяйкой, каждый содержит огромное количество энергии, именно столько, сколько ее выделится при сгорании 3 000 000 ($3 \cdot 10^6$) тонн каменного угля. Таким образом,

26

любой предмет, хотя бы и с очень малой массой, но могущий быть взвешенным на обычных весах, содержит огромное количество энергии, и поскольку люди в своей жизни окружены различными предметами, они окружены огромными запасами энергии, заключенной в этих предметах.



Рис. 1. Два товарных состава везут 3000 т угля. При его сгорании выделится количество энергии, эквивалентное тому, которое содержится в одном грамме любого вещества

Сколь необоснованными кажутся утверждения зарубежных экономистов о том, что человечеству грозит энергетический голод, поскольку исчерпываются запасы каменного угля и нефти. Людям достаточно научиться извлекать энергию из окружающих их предметов, нужно раскрыть секрет природы и научиться выделять энергию из тех или иных тел и направлять ее на решение насущных общественных задач, чтобы двигались поезда, пароходы, освещались города, работали фабрики и заводы и т. д.

Перед людьми встает благороднейшая задача решить проблему использования энергии, заключенной в телах природы. Конечно, надо иметь в

27

виду, что не из всех тел одинаково легко будет извлекать энергию; у одних тел это будет сравнительно легко, у других трудно, а у третьих может быть и даже пока невозможно.

Возникает вопрос, в какой степени удастся людям извлекать энергию из тел природы? Ведь в свете сказанного выше материя не может быть без энергии, поэтому не имеет смысла говорить о полном использовании всей энергии, заключенной в том или ином теле. Нельзя думать, что люди не используют эту энергию; на примере горения каменного угля, хотя бы в топке парового котла или взрыва тротила для разрушения горных пород легко убедиться в том, что эта энергия используется, но только в малой степени, примерно равной 10^{-8} % ($\frac{1}{100000000}$ %), то есть используется 10^{-10} доля всей энергии, заключенной в каменном угле или взрывчатом веществе. Однако эта ничтожно малая доля использования энергии тела не может нас удовлетворить, надо повысить коэффициент использования энергии.

Как об этом подробно будет сказано в дальнейшем, величайшим достижением современной науки и техники является использование в атомных котлах как источника энергии, например, одной из разновидностей урана — его изотопа уран 235. Однако это только первый шаг на пути мирного использования внутриядерной энергии. Для выделения ее пока применяется только управляемая человеком цепная реакция деления ядер урана. В результате такого процесса освобождается лишь ничтожная доля громадных запасов энергии, скрытой в веществе. Достаточно сказать, что при этом освобождается менее одной тысячной доли всей энергии вещества.

Взрывы американских атомных бомб над городами Хиросима и Нагасаки в августе 1945 г. и испытание других атомных бомб в последние годы являются примером использования энергии особых веществ — урана 235 и плутония 239 — примерно на 0,1 %.

В настоящее время мы являемся свидетелями внедрения нового энергетического источника, позволяющего использовать атомную энергию в качестве источника механической и электрической энергии. Даже то сравнительно малое количество ядерной энергии, которое сейчас научились использовать (около 0,1 % энергии расщепляющихся ядер), является колоссальным по сравнению с энергией, добываемой путем химических преобразований.

Успехи науки создали все условия для выполнения задачи использования в мирных целях энергии расщепляющихся ядер, хотя бы для начала на 0,1 %.

Несомненно, в будущем наука найдет пути использования энергии тел в большей степени, но использование ее и на 0,1 % уже даст человечеству действительно огромные количества энергии; простой путь использования ее вначале даже только на 0,1 % разрешит уже многие задачи современной энергетики. Человечеству нужно в будущем научиться полнее использовать энергию тех или иных тел природы, направить это огромное количество энергии на решение народно-хозяйственных задач.

Энергия тел, о которой речь шла выше, называется атомной; невольно возникает вопрос, почему эта энергия называется атомной? Ответ на поставленный вопрос можно получить, рассмотрев проблему строения веществ, то есть тех конкрет-

ных видов материи, из которых построены все тела природы.

На основании сказанного прежде всего можно заключить, что атомная энергия не есть нечто особое и исключительное явление. Наоборот, она весьма обычна, и с атомной энергией люди все время имеют дело, коль скоро они используют различные тела природы и окружающие их предметы для своих нужд. Поэтому ничто сверхъестественное не связано с атомной энергией. Она является просто энергией любого природного тела или искусственно приготовленного того или иного вещества.

4. ВЕЩЕСТВО И ЕГО МОЛЕКУЛЯРНАЯ ПРИРОДА

Детальное изучение природных и искусственно приготовленных тел, окружающих человека, привело к признанию существования веществ как конкретных видов материи, из которых построены все естественные и искусственно приготовляемые тела. Всякое вещество как конкретный вид материи характеризуется определенными свойствами: точками плавления, кипения, показателем преломления света, плотностью и т. д. Каждое тело может состоять из одного вещества или же из нескольких веществ. Примерами веществ являются: вода, сахар, спирт, кислород, водород, железо, медь, углекислый газ и т. д. Всего известно в природе и искусственно приготовлено около полутора миллионов ($1,5 \cdot 10^6$) веществ. Из этих веществ состоят все тела, окружающие человека. Конечно, могут быть в природе вещества, еще не известные человеку, а из известных ему веществ далеко не все еще изучены и не все могут быть искусственно приготовлены в лабораториях и на заводах.

30

Наряду с высказанным определением вещества, широко принятым в химии, часто встречается понимание вещества как конкретного вида материи, которому присуща масса покоя. Каждая материальная частица при движении в пространстве имеет разное значение массы в зависимости от величины скорости

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}},$$

где c — скорость света в вакууме, v — скорость частицы и m_0 — масса покоя, то есть величина массы при условии, что скорость частицы v равна нулю ($v = 0$). Из этой формулы следует, что

$m \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} = m_0$. Для различных частиц — электронов, протонов, нейтронов, атомов, молекул — последняя формула имеет смысл, ибо для них всегда $v \neq c$ и $m_0 \neq 0$. Таким образом, согласно выше сказанному, электроны, протоны и т. д. являются частицами вещества, и электроны, взятые в отдельности, являются веществом, также и протоны и т. д., поскольку им присуща масса покоя.

Однако для световых частиц — фотонов, как видно из формулы, $m_0 = 0$, ибо для них $v = c$, а масса $m \neq 0$, так как фотону присуща энергия и его масса равна $\frac{E}{c^2}$. Следовательно, световые частицы, согласно изложенному, не могут быть отнесены к категории вещества, а они являются просто самостоятельным видом материи, отличным от того, что называют веществом.

Однако в этой брошюре автор использует химическое понимание вещества, которое широко используется в химии и было сформулировано в начале параграфа. Согласно этому определению

31

нию электроны, протоны, фотоны не следует относить к категории вещества, а их следует рассматривать как самостоятельные виды материи. Здесь только следует упомянуть, что некоторые авторы иногда даже не проводят различия между понятиями вещество и материя, что с точки зрения химии и физики едва ли целесообразно.

Изучение веществ привело химиков и физиков к установлению того факта, что каждое вещество состоит из мельчайших частиц одного сорта, называемых молекулами, и, таким образом, каждая молекула, являясь наименьшей частицей вещества, обладает теми же химическими свойствами, что и само вещество. Поэтому разрушение всех молекул вещества эквивалентно разрушению самого вещества. Все молекулы вещества находятся в непрерывном движении, и если вещество пребывает в газовом состоянии, то его молекулы, беспорядочно двигаясь, сталкиваются между собой и со стенками сосуда, в который заключено вещество, обуславливая тем самым давление на стенки этого сосуда. Средняя кинетическая энергия поступательного движения молекулы является величиной, характеризующей и даже обуславливающей температуру вещества. Чем больше эта средняя кинетическая энергия молекул, тем выше температура вещества.

Если же вещество находится в твердом состоянии в форме кристаллов, то молекулы этого вещества располагаются в строго определенном порядке, совершая колебательное движение. Таким образом, вещество в форме кристаллов является собой пример молекулярного порядка, в то время как вещество в газовом состоянии наоборот является примером молекулярного беспорядка.

Итак, если известно около $1,5 \cdot 10^6$ веществ, то значит известно $1,5 \cdot 10^6$ сортов различных молекул. Коль скоро каждое природное тело или искусственно изготовленный предмет состоят из одного или нескольких веществ, то для энергии тела вещество является ее материальным носителем, а так как само вещество состоит из молекул, то последние и являются материальными носителями энергии. Таким образом, материальными носителями атомной энергии являются молекулы, поэтому, поставив задачу отыскания путей практического использования атомной энергии, необходимо кратко ознакомиться с простейшими свойствами молекул.

Прежде всего возникает вопрос о массе и размерах молекул.

Чтобы иметь наглядное представление об этих величинах, достаточно рассмотреть вопрос о числе молекул в том или ином количестве вещества. В настоящее время с большой точностью известно число молекул в любом количестве вещества. Так, в 18 граммах воды (примерно $\frac{1}{10}$ стакана) число молекул воды равно $6,02 \cdot 10^{23}$. Чтобы представить себе наглядно это огромное число, рассмотрим два примера. Если расположить $6,02 \cdot 10^{23}$ десятикопеечных монет на отрезке прямой линии, чтобы ребрами они касались друг друга, то расстояние от земли до солнца ($1,5 \cdot 10^8$ км) уложится на этом отрезке прямой сорок миллиардов раз ($4 \cdot 10^{10}$). Этот пример ярко иллюстрирует тот факт, что число молекул в 18 граммах воды чрезвычайно велико. Другой пример подтверждает сказанное. Если $6,02 \cdot 10^{23}$ песчинок свалить в одну кучу (рис. 2), то образуется гора в виде конуса высотой 60 км и диаметром 200 км.

Исключительно большое число молекул в любом весовом количестве вещества объясняет, почему общее количество энергии в нем, как об этом говорилось выше, также очень велико. Ведь если каждая молекула имеет даже очень небольшое количество энергии, то из-за большого числа молекул любое количество вещества, могущее



Рис. 2. Гора песку содержит столько песчинок, сколько молекул содержится в 18 г воды

быть взвешенным на обычных весах, должно обладать огромным количеством энергии. Этот факт отчасти объясняет, почему обычные предметы обладают чрезвычайно большими запасами энергии.

Из сказанного становится очевидным, что масса молекулы воды очень мала $\frac{18}{6,02 \cdot 10^{23}} \sim 3 \cdot 10^{-23}$ г; очевидно, очень малы и размеры молекул. Для подавляющего большинства веществ их молекулы очень малы как по своим размерам, так и по величине массы.

5. АТОМНОЕ СТРОЕНИЕ ВЕЩЕСТВА, ХИМИЧЕСКИЙ ЭЛЕМЕНТ

Детальное изучение молекул различных веществ показало, что молекулы имеют сложное строение и состоят из более мелких частиц, называемых атомами. Оказалось, что различных сортов атомов относительно немного по сравнению с числом различных сортов молекул. Если последних известно около полутора миллионов, то различных сортов атомов известно в настоящее время только сто один, из них в природе встречаются 88 сортов (некоторые в ничтожно малом относительном количестве), а 13 сортов атомов искусственно приготовлены. Указанные выше полтора миллиона различных молекул построены главным образом из 50—60 сортов атомов.

Таким образом, с одной стороны, огромное разнообразие веществ — $1,5 \cdot 10^6$, а с другой — сравнительно малое число сортов атомов, из которых построены эти вещества.

Множество атомов одного и того же сорта, вне зависимости от того, входят ли эти атомы в состав молекул или являются свободными, называется химическим элементом.

Таким образом, химический элемент есть конкретный вид материи, характеризующийся тем, что он состоит из атомов одного и того же сорта. Каждый химический элемент и его атом обозначаются первой или первой и какой-либо последующей буквой латинского названия элемента. Так, для водорода (атома и элемента) принято обозначение H от латинского слова Hydrogenium, гелия He — Helium, бериллия Be — Beryllium, углерода C — Carbonium, кислорода O —

Oxygenium, натрия Na — Natrium, урана U — Uranium, лития Li — Lithium, бора В — Borum, азота N — Nitrogenium, фтора F — Ftor, тория Th — Thorium, плутония Pu — Plutonium и т. д. Поскольку известен сто один различный сорт атомов, значит, известен сто один химический элемент, постольку должно быть сто одно химическое обозначение для различных сортов атомов и химических элементов.

Прежде всего возникает вопрос о массе атома того или иного элемента. Естественно ожидать, что масса каждого атома очень мала, поскольку малы веса молекул, как известно, состоящих из атомов. Так, вес атома водорода, как самого легкого атома, равен $1,67 \cdot 10^{-24}$ г; атом кислорода имеет массу $26,72 \cdot 10^{-24}$ г. Малые численные значения масс атомов обусловлены тем, что взятая единица массы — один грамм — очень велика по сравнению с массой отдельных атомов. Эти малые численные значения неудобны для решения ряда практических задач. В связи с этим, а также из-за отсутствия первоначальных данных о массах отдельных атомов для измерения массы того или иного атома условились в качестве единицы измерения брать $\frac{1}{16}$ часть массы атома кислорода; масса атома, выраженная в этих единицах, называется атомным весом¹. Таким образом, атомный вес для какого-либо атома и его элемента есть число, которое показывает, во сколько раз масса данного атома больше $\frac{1}{16}$ части массы атома кислорода. С помощью специальных методов удается определить атомные веса всех ато-

¹ О более точном определении понятия атомный вес см. стр. 59.

мов. Для примера приведем ниже в таблице атомные веса некоторых элементов.

Элемент	Химическое обозначение атома	Атомный вес	Элемент	Химическое обозначение атома	Атомный вес
Водород . . .	H	1,008	Азот	N	14,008
Гелий	He	4,003	Кислород	O	16,000
Литий	Li	6,94	Фтор	F	19,00
Бериллий . . .	Be	9,013	Натрий	Na	22,991
Бор	B	10,82	Уран	U	238,07
Углерод . . .	C	12,011			

Для решения многих задач достаточно пользоваться округленными значениями атомных весов; целые числа, ближайшие к величине атомного веса, называются массовыми числами. В таблице, приведенной ниже, даются массовые числа некоторых атомов:

Название элемента -	Химическое обозначение атома	Массовое число
Водород	H	1
Гелий	He	4
Литий	Li	7
Бериллий	Be	9
Кислород	O	16

Продолжение

Название элемента	Химическое обозначение атома	Массовое число
Натрий	Na	23
Алюминий	Al	27
Фосфор	P	31
Иод	I	127
Золото	Au	197
Висмут	Bi	209
Уран	U	238

Рассматривая эту таблицу, мы можем сказать, что масса атома, например, золота приблизительно в 197 раз больше массы атома водорода и т. д. С помощью массовых чисел мы можем приблизительно оценить массу в граммах любого атома: так, масса атома висмута приблизительно равна $209 \cdot 1,67 \cdot 10^{-24} = 349,03 \cdot 10^{-24} \sim 3,5 \cdot 10^{-22}$ г, где $1,67 \cdot 10^{-24}$ г — масса атома водорода.

На основании введенных обозначений можно написать химические формулы для молекул различных веществ, для этого необходимо знать сколько атомов того или иного элемента входит в состав молекулы вещества. Так, известно, что в состав молекулы воды входят два атома водорода и один атом кислорода, поэтому формула молекулы воды имеет вид H_2O , в которой цифра 2, приписанная к обозначению атома водорода, указывает на наличие двух атомов водорода в молекуле воды. В химических формулах цифра 1 не приписывается. В состав молекулы перекиси водорода входят два атома водорода и два атома кислорода, поэтому формула молекулы

38

перекиси водорода может быть записана как H_2O_2 . Имея в виду, что в разные молекулы может входить разное число атомов того или иного элемента, становится понятным, каким образом из сравнительно небольшого разнообразия атомов может образоваться огромное число различных молекул, а именно, как говорилось выше, полтора миллиона.

6. ПЛАНЕТНОЕ СТРОЕНИЕ АТОМА

На основании всего сказанного становится очевидным, что всякое вещество, коль скоро оно построено из молекул, в конечном счете состоит из атомов одного или нескольких элементов, и материальными носителями энергии вещества являются атомы. Этот факт объясняет, почему энергию вещества можно назвать атомной энергией. Таким образом, вопрос о практическом использовании атомной энергии непосредственно связан с вопросом о том, что собой представляет атом.

Детальное изучение атомов показало, что каждый атом по своему строению напоминает планетную систему Солнца. В центре атома находится материальная частица, называемая атомным ядром, вокруг которой вращаются электроны (рис. 3). Свойства электрона были описаны ранее, поэтому отметим только, что все электроны в атоме совершенно одинаковы, они лишь находятся в разных энергетических состояниях¹,

¹ Под энергетическим состоянием электрона в атоме прежде всего следует подразумевать то количество энергии, которое необходимо затратить, чтобы данный электрон можно было извлечь из атома и отвести на достаточно большое расстояние, когда этот электрон практически не испытывает действия со стороны оставшегося электрически заряженного атома.

39

в то время как в солнечной планетной системе все планеты различны.
 Число электронов во всех атомах какого-либо элемента одно и то же, оно называется порядковым числом, или номером, или же числом Менделеева. Поскольку каждый элемент состоит из

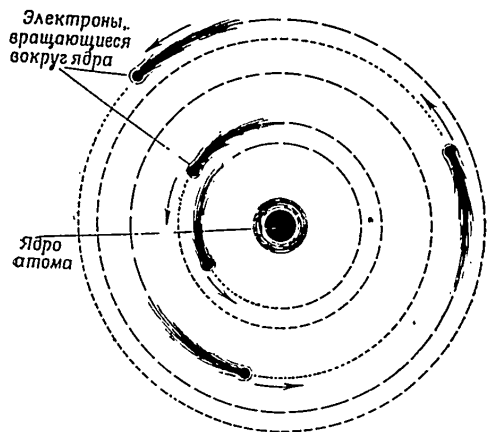


Рис. 3. Схема строения атома. Вокруг атомного ядра движутся электроны

атомов одного и того же сорта, то каждый из этих атомов имеет одно и то же строго определенное число электронов, равное числу Менделеева. Поэтому для каждого элемента число Менделеева является характерной величиной. С помощью ряда экспериментальных методов можно определить эти числа для всех элементов. На основании этих данных составим таблицу чисел Менделеева некоторых элементов.

Название элемента	Химическое обозначение	Массовое число	Число Менделеева, или число электронов в атоме
Водород	H	1	1
Гелий	He	4	2
Литий	Li	7	3
Бериллий	Be	9	4
Бор	B	11	5
Углерод	C	12	6
Азот	N	14	7
Кислород	O	16	8
Фтор	F	19	9
Неон	Ne	20	10
Натрий	Na	23	11
Фосфор	P	31	15
Марганец	Mn	55	25
Иод	I	127	53
Золото	Au	197	79
Висмут	Bi	209	83
Уран	U	238	92

При рассмотрении этой таблицы, которую можно было бы дополнить данными для всех элементов, можно заметить, что для легких атомов число Менделеева в два раза или чуть больше чем в два раза меньше массового числа, в то время как для тяжелых атомов (золото, висмут, уран) массовое число больше чем в два раза числа Менделеева. Этому факту будет дано объяснение в дальнейшем, при рассмотрении атомного ядра.

Итак, каждый атом представляет собой сложную электрическую систему, состоящую из атомного ядра и некоторого числа электронов, вращающихся вокруг него; упрощенно движение электронов можно представить совершающимся по эллиптическим орбитам (рис. 4). Совокуп-

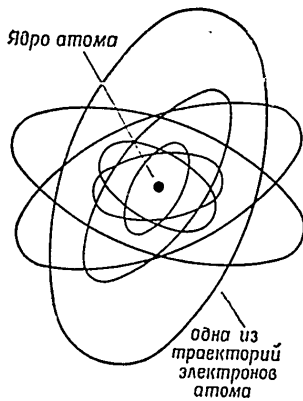


Рис. 4. Примерная схема строения атома с эллиптическими орбитами электронов

ность всех электронов в атоме называют электронной оболочкой атома. На рис. 5 изображены схематически атомы гелия, лития, бериллия, бора, углерода, азота, кислорода, фтора, неона. При рассмотрении этого рисунка видно, что для всех атомов, кроме гелия, электроны электронной оболочки разбиваются на две группы, из которых первая, состоящая из 2 электронов, называется *K*-слоем. Во вторую группу объединяются остальные, по числу не больше восьми электронов (как в случае неона), составляющие *L*-слой электронной оболочки. В атомах с большим числом электронов, как, например, урана, в атомах которого 92 электрона, последние разбиваются на слои: *K*-слой (2 электрона), *L*-слой (8 электронов), *M*-слой (18 электронов), *N*-слой (32 электрона),

O-слой (21 электрон), *P*-слой (9 электронов) и *Q*-слой (2 электрона).

Оптические свойства элемента, то есть спектр испускаемых им световых волн, вызван переходом электронов из одного энергетического состояния в другое. Так, например, если каким-либо путем удалить электрон из *K*-слоя, то на его место перейдет какой-либо из электронов других слоев, при этом будет излучаться рентгеновский свет определенной длины волны, характерной для данного перехода. Таким образом, если в разных атомах переходы электронов на *K*-слой будут происходить из разных слоев, то будут излучаться рентгеновские лучи, состоящие из рентгеновских волн нескольких длин.

Гелий	Литий	Бериллий
Бор	Углерод	Азот
Кислород	Фтор	Неон

● Атомное ядро

⊖ Электрон

Рис. 5. Схемы строения атомов наиболее легких элементов

Оптические свойства атома обусловлены строением его электронной оболочки. Также и химические свойства атома и соответствующего элемента обусловлены строением электронной оболочки атома и прежде всего числом в ней электронов, то есть числом Менделеева. Химическая связь, например, между двумя атомами, образующими ту или иную молекулу, возникает либо в случае перехода одного или нескольких электронов от одного атома к другому, либо путем совместного обладания обоими атомами пары электронов, составленной из электронов по одному от химически связанных атомов. Таким образом, химическая связь между атомами возникает за счет тех или иных процессов в электронных оболочках атомов. При детальном изучении электронных оболочек атомов становится понятным периодический закон Д. Менделеева: химические свойства элементов находятся в периодической зависимости от порядкового номера. Следует отметить, что периодическая система элементов (рис. 6), построенная Менделеевым на основе периодического закона, является важнейшей систематикой химических элементов. Она обусловлена, с одной стороны, возникновением современного нам этапа в развитии химии, а с другой, является путеводной звездой в учении об атоме и путях практического использования атомной энергии.

На основании всего сказанного можно теперь поставить вопрос о размерах атомов. Имея в виду, что атом есть электрическая система из атомного ядра, окруженного электронной оболочкой, под диаметром атома следует понимать диаметр той воображаемой сферы; заключающей в себе атом, внутрь которой не может проник-

нуть другой атом из-за отталкивательных сил, возникающих между электронными оболочками атомов. Схематически два столкнувшихся атома изображены на рис. 7. Изучение различных явлений, в которых принимают участие свободные атомы, показало, что диаметр атома порядка

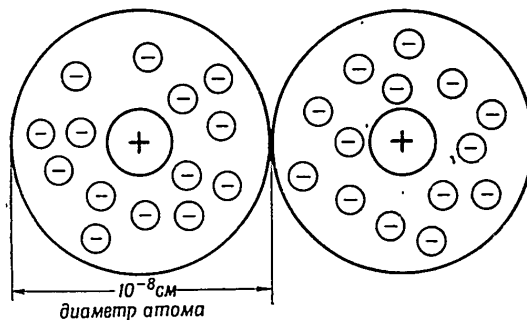


Рис. 7. Диаметр атома как диаметр воображаемой сферы, внутрь которой другой атом проникнуть не может

10^{-8} см, то есть диаметр атома порядка стотриллионных долей сантиметра. Таким образом, видно, что атомы очень малы по своим размерам и на отрезке прямой длиной в 1 см можно уложить сто миллионов атомов.

7. АТОМНОЕ ЯДРО И ЕГО СВОЙСТВА

Выше указывалось, что атом есть электрическая система из ядра и электронной оболочки. Так как атом не имеет свободного электрического заряда, то, очевидно, его ядро должно иметь по-

ложительный электрический заряд, равный по абсолютной величине общему заряду электронной оболочки. Если электрический заряд ядра измерять единицей заряда, равной по абсолютной величине заряду электрона, то поскольку заряд ядра равен заряду всех электронов, он численно равен числу электронов в атоме, то есть порядковому номеру, или числу Менделеева.

В приведенной выше таблице (см. стр. 41), где в одном столбце даны числа электронов в атомах, эти числа столбца можно рассматривать как величины зарядов атомных ядер. Следовательно, порядковые номера, или числа Менделеева, приобретают особый смысл и значение: помимо того, что они являются характерными для элементов, они выражают собой числа электронов в атомах и величины зарядов атомных ядер. Таким образом, атомные ядра атомов водорода, гелия, лития, бериллия, урана, плутония имеют электрические заряды соответственно 1, 2, 3, 4, 92, 94.

Разобрав вопрос о величине заряда атомного ядра, обратимся теперь к вопросу о массах атомных ядер. Прежде всего необходимо иметь в виду, что масса электрона, как об этом говорилось раньше, равна $9,0 \cdot 10^{-28}$ г в то время, как масса атома водорода $1,67 \cdot 10^{-24}$ г. Поэтому масса электрона m_e меньше массы атома водорода m_H в 1855 раз, действительно:

$$\frac{m_e}{m_H} = \frac{9,0 \cdot 10^{-28}}{1,67 \cdot 10^{-24}} = \frac{1}{1855}.$$

Приближенно масса электрона почти в 2000 раз меньше массы атома водорода. В принятой системе оценки масс атомов, когда за единицу измерения массы атомов принята $1/16$ часть массы атома кислорода, масса электрона равна

0,000548, поэтому массовое число как ближайшее целое число к численному выражению массы атома для электрона равно 0. Обращаясь теперь к атому водорода, можно сказать, что поскольку он состоит из ядра, называемого протоном, и одного электрона, то масса протона больше массы электрона в 1854 раза, и, таким образом, масса протона как ядра атома водорода является основной частью массы атома водорода.

Для атома гелия масса его двух электронов почти в 4000 раз меньше массы атомного ядра, и для тяжелого элемента, например, урана масса его 92 атомных электронов почти в 5000 раз меньше массы атомного ядра:

$$\frac{92m_e}{m_U} = \frac{92 \cdot \frac{1}{1855}}{238} = \frac{1}{4760}.$$

Так же можно показать, что для каждого атома любого элемента масса его электронов ничтожно мала по сравнению с массой атомного ядра. Если иметь в виду соотношение $E = mc^2$, то легко видеть, что так как ядру атома присуща основная часть массы атома, то и его энергия является главной частью энергии всего атома. Следовательно, на электронную оболочку атома падает ничтожно малая доля энергии атома. Это обстоятельство объясняет, почему при химических реакциях выделяется ничтожно малая доля энергии атомов. В самом деле, при химических реакциях атомные ядра, обладающие главной частью энергии атомов, остаются неизменными, и реакция между атомами есть, по существу говоря, процесс, обусловленный электронными взаимодействиями, то есть процесс между электронными оболочками атомов.

Так как атомным ядрам присуща главная часть массы атомов, то их энергия — ядерная энергия — есть главная часть атомной энергии. Поставленная выше задача изыскания путей использования атомной энергии в мирных целях хотя бы для начала на 0,1%, сводится, по существу говоря, к отысканию путей использования ядерной энергии. Именно так и стоит вопрос в настоящее время об использовании энергии атомных ядер. Совершенно очевидно, что пути использования ядерной энергии должны быть не химического характера.

В двадцатых годах нашего столетия атомные ядра некоторыми исследователями рассматривались как кладовые энергии, из которых человечество найдет пути черпать энергию. Советский ученый В. И. Вернадский еще в 1922 году сказал, что недалеко то время, когда человек получит в свои руки атомную энергию, такой источник силы, который даст ему возможность строить свою жизнь, как он захочет. В капиталистических странах многие ученые пессимистически относились к проблеме использования энергии ядер и считали атомные ядра могильщиками энергии; эти исследователи не видели путей выделения энергии из атомных ядер. История показала, что правы оказались те ученые, которые видели в атомных ядрах источники энергии.

Конечно, надо иметь в виду, что не из всех атомных ядер одинаково легко извлекать энергию. Теория и опыт показали, что пока есть два пути практического использования ядерной энергии: первый состоит в расщеплении наиболее тяжелых ядер, а второй — в объединении наиболее легких ядер, в их слиянии с образованием более тяжелых. Для атомов с промежуточным зна-

ПЕРИОДИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ЭЛЕМЕНТОВ Д. И. МЕНДЕЛЕЕВА

ПЕРИОДЫ	ГРУППЫ	ЭЛЕМЕНТОВ													
		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII		RO	- O			
РОДЫ		R ₂ O	RO	R ₂ O ₃	RH, RO ₂	RH, R ₂ O ₃	RH, RO ₂	RH, RO ₂	RH, RO ₂	RH, RO ₂	(H)				
I	1	H водород 1,0080													He гелий 4,003
II	2	Li литий 6,940	Be бериллий 9,012	B бор 10,81	C углерод 12,01	N азот 14,008	O кислород 16,000	F фтор 19,00							Ne неон 20,183
III	3	Na натрий 22,991	Mg магний 24,31	Al алюминий 26,98	Si кремний 28,09	P фосфор 30,97	S сера 32,06	Cl хлор 35,457							Ar аргон 39,944
IV	4	K калий 39,098	Ca кальций 40,08	Sc скандий 44,96	Ti титан 47,88	V ванадий 50,94	Cr хром 52,01	Mn марганец 54,94	Fe железо 55,85	Co кобальт 58,93	Ni никель 58,71				Kr кrypton 83,80
V	5	Zn цинк 65,38	Ga галлий 69,72	Ge германий 72,60	As мышьяк 74,91	Se селен 78,96	Br бром 79,916								
VI	6	Rb рубидий 85,48	Sr стронций 87,63	Yтрий 88,91	Zr цирконий 91,22	Nb ниобий 92,91	Mo молибден 95,95	Tc технеций (93)	Ru рутений 101,1	Rh родий 102,91					Xe ксенон 131,3
VII	7	Ag серебро 107,880	Cd кадмий 112,41	In индий 114,82	Sn олово 118,710	Sb сурьма 121,76	Te теллур 127,61								
VIII	8	Cs цезий 132,91	Ba барий 137,35	La лантан 138,91	Hf гафний 178,5	Ta тантал 180,95	W вольфрам 186,21	Re рений 186,21	Os осмий 190,2	Ir иридий 192,2	Pt платина 195,23				
IX	9	Au золото 197,0	Hg ртуть 200,59	Tl таллий 204,39	Pb свинец 207,2	Bi висмут 209,00	Po полоний 210,0	At астатин (210)							Rn радон 222,0
X	10	Fg франций (223)	Ra радий 226,02	Ac актиний 227											

ЦЕЛЕСОБНОСТЬ	58	59	60	61	62	63	64
Ce церий 140,12	Pr празеодим 140,92	Nd неодим 144,24	Pm прометий (145)	Sm самарий 150,03	Eu европий 151,96	Gd гадолиний 157,25	Tb тербий 158,93
Dy диспрозий 162,50	Ho гольмий 164,93	Er эрбий 167,26					

АКТИНОИДЫ	90	91	92	93	94	95	96
Th торий 232,04	Pa протактиний 231	U уран 238,03	Np нептуний 237	Pu плутоний 244	Am америций (243)	Cm курций (247)	
Bk беркелий (247)	Cf калифорний (251)	E эйнштейний (252)	Fm фермий (257)	Mv менделевий (258)			

26
Fe
ЖЕЛЕЗО
Число Менделеева (порядковый номер)
Химическое обозначение
Известное значение элемента
55,85
Атомный вес
26

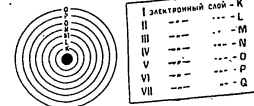


Рис. 6. Периодическая система элементов Д. И. Менделеева

чением массы пока нет путей практического использования энергии их ядер.

Обратимся теперь к очень важному для проблемы практического использования атомной энергии вопросу, именно к размерам атомных ядер. Многочисленные экспериментальные исследования показали, что атомные ядра можно рассматривать как маленькие шарики, диаметр которых для легких атомов (водород, гелий и др.) порядка 10^{-13} см, а для тяжелых (висмут, торий, уран) порядка 10^{-12} см. Если иметь в виду, что диаметр атома порядка 10^{-8} см, а диаметр ядра 10^{-13} см, то размер атома в сто тысяч (то есть 10^5) раз более размера атомного ядра и соответственно объем атома в миллион миллиардов (то есть 10^{15}) раз более объема атомного ядра.

Таким образом, ядро по своим размерам занимает ничтожно малую часть объема атома. Если представить себе (рис. 8) ядро увеличившимся до размера шарика диаметром один сантиметр, то при соответственном увеличении всего атома в целом его диаметр будет равен одному километру. В случае если ядро возрастет до размера булавочной головки, атом должен увеличиться до размеров высотного дома, или же, приняв ядро атома возросшим до размеров высотного дома, атом соответственно должен возрасти до размера Земли (рис. 9).

Чтобы еще нагляднее продемонстрировать сказанное, представим себе озеро с площадью водяного зеркала в один квадратный километр (1 км^2) и глубиной в двадцать метров (20 м). Если из всех молекул воды этого озера, изъять все атомные ядра, то есть атомные ядра водорода (протоны) и кислорода, и соединить их все вместе,

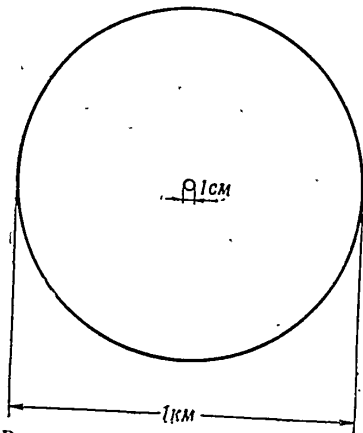


Рис. 8. Сопоставление размеров атома и его ядра

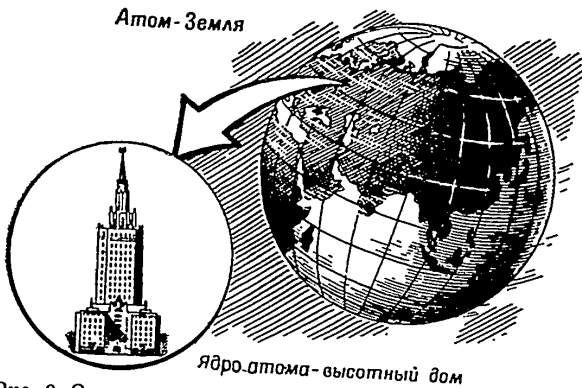


Рис. 9. Сопоставление размеров атома (Земля) и его ядра (высотный дом)

то они будут занимать объем в один кубический миллиметр (1 мм^3), масса которого будет равна двадцати миллионам тонн ($20 \cdot 10^6 \text{ т}$). Таким образом, мы можем сказать, что атомные ядра в любом веществе занимают ничтожно малую долю его объема.

Если бы движение электронов не мешало прохождению видимого света и помехой было бы лишь экранирующее действие поперечных сечений частиц вещества (электронов и атомных ядер), то в тонких слоях непрозрачных веществ не существовало бы. Так, для олова сумма поперечных сечений атомных ядер и электронов равнялась бы площади сечения куска металла при длине его 60 см. Площадь же всех сечений атомных ядер равнялась бы площади сечения куска олова длиной три метра. Отмеченная здесь «прозрачность» вещества, обусловленная малым поперечным сечением атомных ядер, имеет весьма существенное значение для проблемы практического использования ядерной энергии, как об этом будет сказано ниже.

В любом количестве вещества все атомные ядра и электроны действительно занимают ничтожную часть пространства; материя, из которой состоят электроны и атомные ядра, действительно заключена в очень малом объеме, по сравнению с объемом всего вещества. Именно это и дало основание английскому ученому Резерфорду к высказыванию о том, что «материя», понимаемая им как синоним вещества, «пуста». Однако неправильность этого утверждения видна из того, что вокруг всякого электрического заряда, а, следовательно, вокруг атомного ядра и вокруг каждого электрона создается так называемое электрическое поле, которое из-за объективности

его существования является также материей; поэтому весь атом заполнен материей, а электроны и атомное ядро могут рассматриваться сгустками материи. Поскольку все пространство всякого атома заполнено материей, то любой кусок вещества сплошь заполнен ею, следовательно, материя не может быть «пустой».

В заключение настоящего параграфа следует остановиться на общепринятой системе обозначения атомных ядер. Атомное ядро какого-либо элемента обозначают так же, как сам элемент и его атом, первой или первой и какой-либо последующей буквой латинского названия элемента.

Снизу налево от химического обозначения элемента пишут число Менделеева элемента, которое показывает величину электрического заряда атомного ядра. Приписывание этого числа не является необходимым, так как данному химическому элементу, имеющему строго определенное обозначение, соответствует вполне определенное число Менделеева. Справа сверху пишут массовое число атома. Так, для фтора, характеризующегося числом Менделеева 9 и массовым числом 19, обозначение атомных ядер имеет вид ${}^9\text{F}^{19}$, для атомного ядра тория — ${}_{90}\text{Th}^{232}$. Этих двух примеров достаточно для иллюстрации принципа обозначения атомных ядер.

8. СОСТАВ АТОМНЫХ ЯДЕР

Исследования советских ученых Д. Д. Иваненко и Е. Н. Гапона и независимо от них немецкого ученого Гейзенберга привели к идее о том, что атомные ядра состоят из двух сортов частиц — протонов и нейтронов, как это схематически изображено на рис. 10.

52

Протон есть атомное ядро водорода с массовым числом 1 (масса 1,00758) и с положительным зарядом; обозначение протона, очевидно, ${}^1\text{H}^1$; ради краткости применяют обозначение p . Нейтрон есть материальная частица, не имеющая

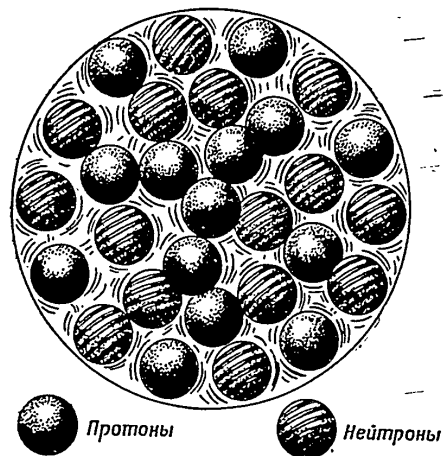


Рис. 10. Атомное ядро состоит из протонов и нейтронов

свободного электрического заряда, следовательно, нейтральная частица, что выражено в названии нейтрон. Массовое число нейтрона 1 (масса 1,00895). Для нейтрона принято обозначение ${}^0n^1$, или просто n . Частицы, входящие в атомное ядро — протоны и нейтроны — часто объединяют общим названием нуклоны. Гипотеза о нуклонном строении атомных ядер нашла многочислен-

53

ные теоретические и экспериментальные подтверждения и в настоящее время является общепринятым воззрением на природу атомных ядер.

Если иметь в виду важнейшее положение современной атомной физики о неизменности электрического заряда, то протоны, входя в то или иное атомное ядро, вносят в него свой положительный электрический заряд, и, таким образом, положительный электрический заряд атомного ядра возникает от зарядов протонов, входящих в ядро. На основании этого факта легко определить число протонов, входящих в атомное ядро.

Действительно мы условились измерять электрический заряд единицей, равной по абсолютному значению заряду электрона, и тогда заряд протона, как ядро атома водорода, в который входит один электрон, равен единице, а заряд любого атомного ядра, как об этом говорилось выше, равен числу Менделеева. Поэтому число Менделеева, выражая собой заряд атомного ядра, дает число протонов в атомном ядре. Следовательно, численный индекс, приписываемый в обозначении атомного ядра налево внизу от химического знака, выражает собой число протонов в атомном ядре.

Имея в виду, что массовое число каждого в отдельности нуклона, то есть как протона, так и нейтрона, равно единице, мы можем сказать, что массовое число атомного ядра дает общее число нуклонов в атомном ядре, и, таким образом, общее число протонов и нейтронов в атомном ядре равно его массовому числу. Поэтому, зная число Менделеева атомного ядра, то есть, зная число протонов в нем, мы можем легко найти число нейтронов, входящих в это атомное ядро.

Чтобы найти число нейтронов в атомном ядре,

достаточно найти разность между массовым числом (числом нейтронов и протонов в ядре) и числом Менделеева, как числом протонов в атомном ядре. Для двух приведенных выше примеров атомных ядер ${}_{9}\text{F}^{19}$ и ${}_{90}\text{Th}^{232}$ в состав ядра атома фтора (${}_{9}\text{F}^{19}$) входит 9 протонов и $19 - 9 = 10$ нейтронов, а в ядро атома тория (${}_{90}\text{Th}^{232}$) входит 90 протонов и $232 - 90 = 142$ нейтрона. На основании всего сказанного следует, что знание массового числа и числа Менделеева для того или иного атомного ядра достаточно для определения его состава, установления числа в нем протонов и числа нейтронов.

9. ИЗОТОПЫ

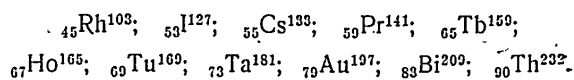
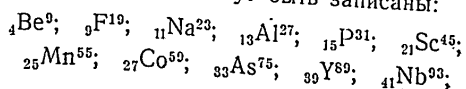
Изучение составов различных атомных ядер убеждает нас в существовании таких ядер, в которых при одном и том же числе протонов могут находиться в ядрах различные числа нейтронов. Такие атомные ядра, которые содержат одинаковое число протонов, но разные числа нейтронов, то есть имеют разные массовые числа при одном и том же числе Менделеева, называются изотопами. Так как число Менделеева не только выражает собой заряд атомного ядра, но и число электронов в соответствующем атоме, то изотопы являются атомами с разными массовыми числами, но с одинаковым числом электронов в электронных оболочках. Химические свойства атома определяются строением его электронной оболочки, а это строение обусловлено зарядом ядра и числом электронов в атоме. Поэтому изотопы, как атомы с одинаковым числом электронов в электронных оболочках, имеют одинаковые химические свойства. Это обстоятельство объясняет,

почему изотопы нельзя разделять, или, точнее, чрезвычайно трудно разделять с помощью химических процессов.

Слово «изотоп» составлено из двух греческих слов «изос» — равный, «топос» — место, поэтому слово изотопы означает «одинаково-местные». Это название возникло из того соображения, что изотопы, как атомы с одинаковыми химическими свойствами и одинаковыми числами Менделеева, относятся к одному и тому же элементу, а значит, все изотопы соответствуют одной и той же клетке, одному и тому же месту периодической системы элементов Д. И. Менделеева.

В последнее время словом «изотоп» стали просто называть множество атомов с одним и тем же числом Менделеева и одним и тем же массовым числом, то есть одну какую-либо разновидность атомов; например, говорят, что природный углерод состоит из двух изотопов: C^{12} и C^{13} . Все атомы C^{12} образуют один изотоп, другим изотопом являются атомы C^{13} .

Если же у атомов одинаковые массовые числа, но различные числа протонов в атомных ядрах, то есть разные порядковые номера (числа Менделеева), то атомы называются изобарами. Многие природные элементы, как бериллий, фтор, натрий, алюминий, фосфор, скандий, марганец, кобальт, мышьяк, иттрий, ниобий, родий, иод, цезий, празеодим, тербий, гольмий, тулий, тантал, золото, висмут, торий таковы, что каждый из них состоит из одного изотопа и называют их иногда «одиночками». Для этих элементов их атомные ядра соответственно могут быть записаны:



Все остальные элементы являются смесями изотопов, или, как принято говорить, «плеядами» изотопов. Некоторые из них, как природная ртуть, природное олово, состоят из большого числа изотопов, например, для ртути число всех изотопов — 7, для олова — 10. Некоторые же элементы, как серебро, сурьма, индий и др., таковы, что каждый из них является смесью двух изотопов. В качестве примера природного элемента, состоящего из трех изотопов, можно привести кислород. Этот пример имеет особое значение, поскольку в качестве единицы измерения масс атомов принята $1/16$ часть массы атома кислорода, и потому, если кислород состоит из трех изотопов, то как же быть с определением единицы измерения масс атомов?

Из-за существования трех изотопов O^{16} , O^{17} и O^{18} в природном кислороде в физике за единицу измерения масс атомов принимают $1/16$ часть массы самого легкого изотопа O^{16} , равную $1,66 \cdot 10^{-24}$ г. Данные об этих изотопах приведены ниже, в таблице.

Обозначение изотопа	Масса	Массовое число	Содержание в % в природном кислороде
O^{16}	16,0000	16	99,757
O^{17}	17,00450	17	0,039
O^{18}	18,00485	18	0,204

На основании данных таблицы можно оценить среднюю массу атома кислорода, которая, очевидно, равна

$$\frac{99,757 \cdot 16,0000 + 0,039 \cdot 17,00450 + 0,204 \cdot 18,00485}{100} = 16,0044.$$

В химии же в качестве единицы измерения масс атомов, как об этом говорилось выше, принимают $1/16$ часть средней массы атома природного кислорода. Легко видеть, что в физике за единицу массы принимают меньшую величину, чем в химии. Так, в физической системе средняя масса атома кислорода равна 16,0044, в то время как в химической системе ее принимают равной 16,0000.

На основании сказанного ясно, что масса того или иного атома в физической системе выражается большей величиной, чем в химической системе. Поэтому, чтобы перейти от численного значения массы в физической системе к численному значению массы в химической системе, надо первую умножить на

$$\frac{16,0000}{16,0044} = 0,99972;$$

обратный переход можно осуществить умножением на

$$\frac{1}{0,99972} = 1,000272.$$

В связи со сказанным относительно сложности изотопного состава и многих природных элементов невольно возникает вопрос о сущности атомного веса элемента. Совершенно ясно, что в физике атома, роль скоро представляется возмож-

ным определять массу каждого изотопа - в отдельности, можно говорить об изотопном весе каждого изотопа. В данном случае, очевидно, под изотопным весом следует понимать число, которое показывает, во сколько раз масса атома данного изотопа больше $1/16$ части массы атома самого легкого природного изотопа кислорода. Поскольку разработка терминологии в настоящее время отстает от развития науки, вместо правильного термина изотопный вес употребляют термин атомный вес изотопа.

В химии дело обстоит значительно сложнее. При химических методах исследования не представляется возможным определить массу одного атома, или разделять изотопы одного и того же элемента. Поэтому при определении атомного веса элемента при химических методах исследования неминуемо используется большое количество элемента, заключающее огромное число его атомов. Анализируя результаты изучения атомного веса элемента, в химии следует дать понятие атомный вес следующего определение. Атомным весом элемента в химии называют число, которое показывает, во сколько раз средняя масса атома природного элемента больше $1/16$ части средней массы атома природного кислорода. Конечно, в том случае, если природный элемент состоит только из одного изотопа, то речь может идти об атомном весе данного изотопа. Обращаясь теперь к периодической системе, мы видим в ней в каждой клетке наряду с обозначением химического элемента и его атомный вес, который следует рассматривать как химический атомный вес.

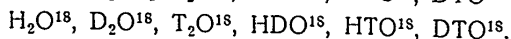
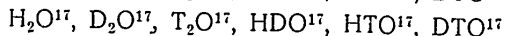
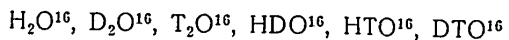
Для проблемы практического использования ядерной энергии особое значение приобрели изотопы водорода и изотопы урана. Исследования

показали, что природный водород состоит из трех изотопов, данные о которых приведены ниже, в таблице.

Название изотопа	Масса при $O^{16} = 16,00$	Массовое число	Обозначение атомного ядра	Содержание изотопа в % в природном водороде
Протий	1,008131	1	${}_1H^1$ или H	99,9844
Дейтерий	2,014725	2	${}_1H^2$ или D	0,0156
Тритий	3,017004	3	${}_1H^3$ или T	Следы

Обычно протий называют легким водородом, дейтерий — тяжелым водородом, а тритий — сверхтяжелым водородом.

Имея в виду изотопные составы водорода и кислорода, а также тот факт, что в молекулу воды входят два атома водорода и один атом кислорода и формула воды имеет вид H_2O , мы можем теперь сказать, что вода состоит из молекул следующего состава:



Таким образом, обычная природная вода состоит из 18 сортов молекул. Конечно, из-за наибольшей распространенности протия и кислорода с массовым числом 16,0000, наибольшее число молекул в воде имеет состав H_2O^{16} ; молекул воды, содержащих тритий, ничтожно малое число по сравнению с числом молекул H_2O^{16} . Молекулы воды, содержащие дейтерий состава D_2O^{16} , носят название тяжелой воды.

Возникает естественный вопрос: в чем состоит различие протия, дейтерия и трития? Очевидно, главное отличие заключается в неодинаковости атомных ядер этих трех изотопов. Ядро атома протия, как об этом говорилось, состоит из одного протона, и атом протия может быть пред-

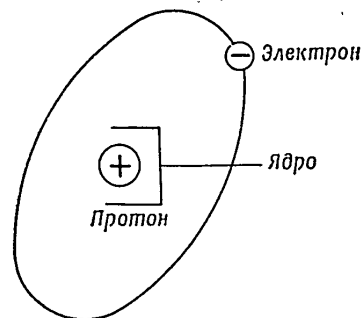


Рис. 11. Схема строения атома протия, наиболее легкого изотопа водорода

ставлен в виде протона, вокруг которого вращается один электрон; схема атома протия представлена на рис. 11. Ядро атома дейтерия — дейтерон, как легко убедиться, состоит из одного протона и одного нейтрона. Схема атома дейтерия изображена на рис. 12. Соответственно ядро атома трития — тритон — состоит из одного протона и двух нейтронов. Схема атома трития изображена на рис. 13. Другой элемент, представляющий особый интерес для проблемы практического использования ядерной энергии, — уран — является смесью трех изотопов. Данные об этих изотопах приведены в таблице на стр. 63.

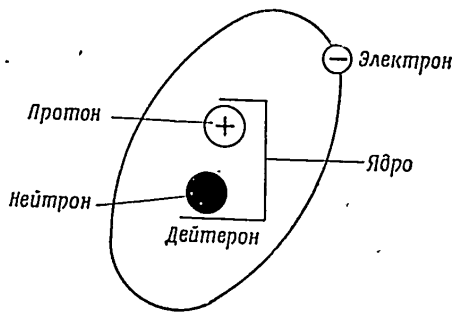


Рис. 12. Схема строения атома дейтерия, тяжелого изотопа водорода

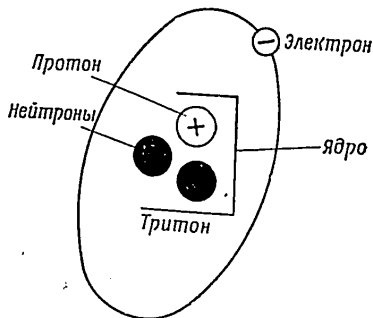


Рис. 13. Схема строения атома трития, сверхтяжелого изотопа водорода

Название изотопа	Обозначение ядра	Содержание изотопа в % в природном элементе
Уран 238	${}_{92}^{238}\text{U}$	99,28
Уран 235	${}_{92}^{235}\text{U}$	0,714
Уран 234	${}_{92}^{234}\text{U}$	0,00548

Различие этих трех изотопов урана состоит в том, что ядро наиболее тяжелого изотопа урана 238 состоит из 92 протонов и $238 - 92 = 146$ нейтронов. Соответственно, для более легких изотопов составы атомных ядер будут иными; так, для урана 235 (называемого часто актиноураном), в его атомном ядре содержится 92 протона и $235 - 92 = 143$ нейтрона, а в атомном ядре изотопа урана 234 содержится 92 протона и $234 - 92 = 142$ нейтрона.

Из этих трех изотопов особое значение имеют первые два: уран 238 и уран 235. В природном уране содержание урана 238 в 140 раз больше, чем второго.

Кроме приведенных примеров, когда химический элемент является плеядой нескольких изотопов, можно было бы указать много еще элементов, являющихся также плеядами нескольких изотопов.

10. ПРИРОДА СИЛ В АТОМНОМ ЯДРЕ

Общеизвестным является факт наличия сил взаимодействия между электрическими зарядами. Если два электрических заряда имеют один и тот же знак, то есть, когда они оба или положительны или отрицательны, они отталкиваются друг от друга; если же знаки зарядов неодинаковы, то есть когда один заряд положительный,

а другой отрицательный, оба заряда притягиваются друг к другу. Сила отталкивания и сила притяжения характеризуются одним и тем же законом, называемым законом Кулона. Электрическая сила взаимодействия двух точечных электрических зарядов пропорциональна величинам зарядов и обратно пропорциональна квадрату расстояния между зарядами. Если обозначить силу взаимодействия буквой F , величины зарядов e_1 и e_2 , а расстояние между зарядами r , то закон Кулона можно записать в виде формулы

$$F = \frac{e_1 \cdot e_2}{D \cdot r^2},$$

где в коэффициенте пропорциональности $\frac{1}{D}$ знаменатель D называется диэлектрической постоянной, или диэлектрической проницаемостью, равной для вакуума единице.

Многочисленные исследования показали, что закон Кулона правильно отражает характер взаимодействия между электрическими зарядами, находятся ли они на большом или очень малом расстоянии друг от друга, даже порядка 10^{-13} см, то есть порядка радиуса атомного ядра. Протоны, входя в атомное ядро, вносят в него положительные заряды и в силу сказанного отталкиваются друг от друга. Так как расстояние между протонами в ядре невелико и поскольку в законе Кулона величина расстояния между зарядами входит в знаменатель, да еще во второй степени, то сила электрического отталкивания протонов друг от друга очень велика. Невольно возникает вопрос, что же удерживает протоны в атомном ядре? Оказывается, атомных ядер, за исключением атомного ядра водорода, состоящих только из протонов, нет; всегда в атомных ядрах,

кроме протонов, содержатся еще и нейтроны. Очевидно, вхождение нейтронов в атомное ядро вызывает уменьшение концентрации электрического заряда в ядре, как бы разбавление протонов нейтронами. С другой стороны, исследование взаимодействия между протонами, между нейтронами и протонами, а также между нейтронами привело к обнаружению сил притяжения, действующих между разнородными или одинаковыми нуклонами. Эти силы проявляются, в отличие от кулоновских сил, лишь на расстояниях, не превышающих диаметра ядра атома, то есть на расстояниях не больше чем 10^{-13} см.

Силы притяжения между нуклонами называются ядерными силами. Из-за малого радиуса действия (малого расстояния между нуклонами, при котором они заметны) эти силы притяжения непосредственно не проявляют себя в межатомных или межмолекулярных взаимодействиях, и потому обычно человеку не приходится иметь с ними дело. Они только тогда проявляют себя, когда какая-либо частица приходит в непосредственное соприкосновение с атомным ядром.

Вот эти ядерные силы, действующие между нуклонами (протонами и нейтронами) в атомном ядре, и обеспечивают стягивание их друг к другу и тем самым противодействуют кулоновским силам отталкивания между протонами. Таким образом, существование атомных ядер обеспечивается ядерными силами притяжения между нуклонами, входящими в состав атомных ядер.

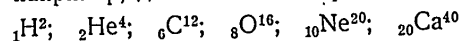
Легко заключить из всего сказанного, что атомное ядро является ареной, на которой разыгрываются ядерные явления под воздействием двух родов сил: притяжения между всеми нуклонами и сил отталкивания между частью их — именно

между протонами. Если только сделать предположение, что в какой-то момент (кстати отметить, что физически это неосуществимо) ядерные силы перестанут действовать или существенно ослабнут, то ядро мгновенно разрушится, так как все протоны под влиянием отталкивательных сил разлетятся в разных направлениях. Итак, существование и свойства атомных ядер являются результатом борьбы двух противоположных начал, одно из которых — кулоновские силы — стремится разрушить атомное ядро, а другое, наоборот, стремится стянуть ядерные частицы и тем самым обеспечить существование ядра.

Необходимо заметить, что сам факт существования ядра свидетельствует о взаимной нейтрализации отталкивательных сил и сил притяжения, то есть действию всех отталкивательных сил противостоит равное по интенсивности, но противоположное по знаку действие сил притяжения.

Очевидно, что для больших атомных ядер, в состав которых входит большое число протонов и нейтронов, ядерные силы обеспечивают стягивание нуклонов, находящихся лишь в непосредственной близости; поэтому в большом атомном ядре, например, урана ядерные частицы, лежащие на противоположных концах диаметра ядра, не испытывают взаимного действия сил притяжения в то время, как силы отталкивания электрического происхождения как действующие силы проявляются во взаимном отталкивании для всех протонов в атомном ядре. Поэтому естественно высказать предположение, что легкие атомные ядра с небольшим числом нуклонов в них, могут быть устойчивыми, поскольку ядерные силы притяжения имеют место между всеми нуклонами.

Наоборот, атомные ядра с большим числом Менделеева, то есть большим числом протонов в них, должны быть неустойчивыми из-за того, что силы отталкивания простираются на всю область атомного ядра и увеличение числа протонов в атомном ядре усиливает стремление протонов вылететь из атомного ядра. Естественно поэтому, в легких устойчивых атомных ядрах число протонов примерно равно числу нейтронов, в то время как для тяжелых атомных ядер число нейтронов значительно превышает число протонов. Так, например, для атомных ядер



числа нейтронов (N) соответственно равны 1, 2, 6, 8, 10, 20, т. е. такие же, как и числа протонов (Z). Для тяжелых ядер, например, ${}_{90}\text{Th}^{232}$, ${}_{92}\text{U}^{238}$ и других числа Z равны 90 и 92, а числа нейтронов соответственно равны $232 - 90 = 142$ и $238 - 92 = 146$, поэтому отношение числа нейтронов к числу протонов равно $\frac{140}{90} = 1,58$ и $\frac{146}{92} = 1,59$, то есть число нейтронов несколько больше чем в полтора раза превышает число протонов. Очевидно, нейтроны, входящие в атомное ядро, как бы разбавляют собой протоны, и концентрация протонов в ядре меньше, вследствие чего несколько ослабляются электрические силы взаимного отталкивания.

11. ЭНЕРГИЯ СВЯЗИ В АТОМНЫХ ЯДРАХ; ФИЗИЧЕСКАЯ СУЩНОСТЬ ПОНЯТИЯ ВЫДЕЛЕНИЕ ЭНЕРГИИ И ПУТИ ПРАКТИЧЕСКОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГИИ

Чтобы выяснить, возможные пути практического использования ядерной энергии, необхо-

димо разобрать понятие энергии связи атомного ядра. Если какие-либо две взаимно притягивающиеся частицы, находящиеся на некотором расстоянии друг от друга, удалять одну от другой, для этого надо выполнить работу. Поэтому удаление друг от друга притягивающихся частиц сопряжено с необходимостью затраты работы, а следовательно, связано с увеличением энергии обеих частиц.

Таким образом, оказывается, что две притягивающиеся частицы имеют энергию большую в случае большего расстояния между ними. И поэтому две такие частицы, находящиеся в непосредственной близости друг к другу, имеют меньше энергии, чем для случая, когда они будут удалены друг от друга. Таким образом, если две притягивающиеся частицы, удаленные друг от друга, предоставить самим себе, то под влиянием сил притяжения они сблизятся и придут в такое состояние, когда они должны иметь меньше энергии, чем для случая своего исходного положения.

В силу закона сохранения энергии, то есть неизменности общего количества энергии, очевидно, при сближении эти частицы должны выделить энергию, например, излучив фотоны. Поэтому, если две ядерные частицы, например протон и нейтрон, притянутся друг к другу и образуют дейтерон, то при этом выделяется фотон, который будет содержать количество энергии, равное разности энергии свободных протона и нейтрона и связанных в форме дейтрона.

Таким образом, сближение свободных нуклонов под влиянием ядерных сил неминуемо должно быть связано с излучением фотонов, или, как говорят, с выделением энергии. Образование любого атомного ядра можно себе представить как

68

результат стягивания соответствующих протонов и нейтронов под влиянием ядерных сил, сопровождающегося выделением энергии. Поэтому энергия всякого ядра меньше на определенную величину энергии свободных нуклонов. Очевидно, для полного разрушения атомного ядра, то есть для полного отделения всех его нуклонов друг от друга, необходимо сообщить ему энергию, иначе говоря, нужно затратить некоторую работу для преодоления ядерных сил.

Конечно, факт, что атомное ядро имеет меньше энергии, чем свободные нуклоны, вовсе не говорит о том, что энергию, имеющуюся в атоме, нельзя использовать. При формировании атомного ядра из нуклонов имеет место лишь небольшое уменьшение энергии, и в атомном ядре остается основная часть энергии от той, которая присуща свободным нейтронам и протонам.

Рассмотрим сейчас опыт, который, конечно, можно лишь мысленно осуществить, если представить себе человека размером с атомное ядро, который собирается извлечь один из протонов ядра. Допустим, что воображаемому человеку удалось зацепиться за один из протонов внутри атомного ядра, как это изображено на рис. 14, и он решил вытащить протон¹. Пока протон находится внутри атома, окруженный со всех сторон нуклонами, он испытывает со всех сторон

¹ Приведенное ниже описание вытаскивания протона из ядра предполагает распределение протонов, более или менее равномерное, внутри ядра. Однако есть серьезные основания к тому, чтобы допустить, что протоны будут преимущественно располагаться у поверхности атомного ядра, если последнее рассматривать как каплю ядерной жидкости. Подобное расположение протонов, очевидно, должно быть обусловлено отталкивательными электрическими силами.

69

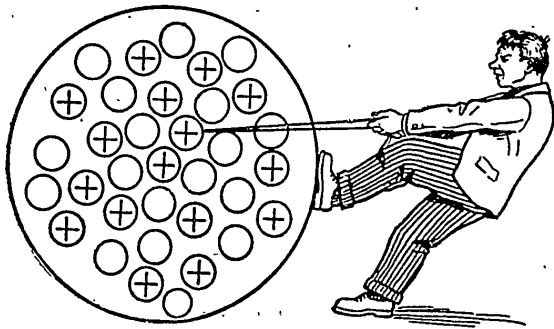


Рис. 14. Иллюстрация извлечения протона из атомного ядра: пока протон внутри ядра, для перевода его на поверхность не надо много усилий. Основное усилие надо для преодоления ядерных сил, для перевода протона с поверхности на расстояние от нее, равное 10^{-13} см

равные силы, и человеку, очевидно, не представит особого труда подтащить его почти к поверхности ядра. Но как только протон приблизится к поверхности ядра, асимметрия расположения всех нуклонов относительно данного протона скажется в том, что этот протон будет испытывать ядерные силы, втягивающие его внутрь ядра. Очевидно, человеку понадобится затратить много усилий; ему придется выполнить работу против ядерных сил, чтобы с помощью этих усилий перенести свою энергию внутрь ядра. Наконец, выполнив поистине титаническую работу, человеку, допустим, удалось вытянуть протон на поверхность ядра. Надо, конечно, иметь в виду, что преодолевать ядерные силы человеку помогали силы электрического отталкивания данного протона другими ядерными протонами. За-

тем, продолжая прикладывать свои усилия, человек начал отделять протон от ядра, то есть отталкивать его от поверхности ядра. Человеку придется много потрудиться, пока он будет отталкивать протон от ядра на расстояние радиуса действия ядерных сил, то есть на расстояние порядка 10^{-13} см. Как только он преодолеет ядерные силы, а последние быстро уменьшаются с увеличением расстояния от ядра, протон по прекращении действия ядерных сил начнет испытывать отталкивательные силы от всех протонов, оставшихся в ядре, поскольку силы электрического отталкивания — дальнедействующие силы и действуют как на малых, так и больших расстояниях. Таким образом, человек, преодолев силы ядерного притяжения, почувствует, что протон начнет сам отделяться от ядра со все возрастающей скоростью.

Протон, отталкиваясь от ядра силами электрического взаимодействия, начнет двигаться все

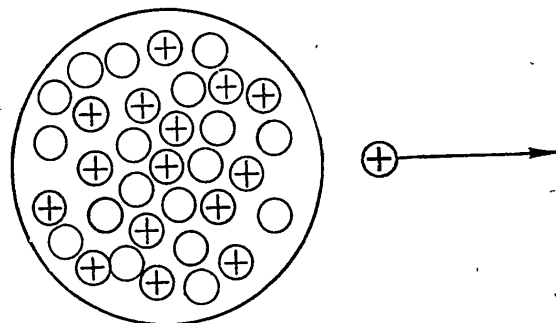


Рис. 15. Протон, извлеченный из ядра, испытывает отталкивательные силы от ядра

быстрее и быстрее (рис. 15), приобретая в конце концов очень большую скорость, а значит, и кинетическую энергию. Таким образом, протон, удалившись от ядра, будет иметь значительную кинетическую энергию, следовательно, он ее приобрел, а атомное ядро соответствующее количество энергии, очевидно, потеряло. Отталкивание электрическими силами протона от ядра приводит к переносу к протону от ядра энергии. Этот перенос энергии в сущности означает превращение ее из потенциальной формы в ядре в энергию движущегося тела, то есть кинетическую энергию. Этот перенос энергии, или ее превращение из скрытой в ядре формы в явную форму — энергию движения, называют выделением энергии. Таким образом, мысленный опыт с человечком, вытаскивающим протон из ядра, можно теперь описать как сообщение вначале энергии ядру для извлечения протона из ядра и последующее выделение ядром энергии. Физическая сущность явления преобразования энергии ядра в кинетическую энергию протона, очевидно, надо представлять себе как передачу энергии сначала от ядра к окружающему его электрическому полю, а последнее передает эту энергию движущемуся протону.

Рассмотренный случай выделения энергии атомным ядром, состоящий в преобразовании энергии ядра в кинетическую энергию протона, не является единственно возможным. Совершенно аналогичный случай выделения энергии имеет место, когда из атомного ядра вылетает материальная частица, несущая положительный электрический заряд. Совсем иной характер выделения энергии атомным ядром наблюдается при излучении ядром гамма-фотона. В этом случае атомное ядро преобразует свою энергию в энер-

гию гамма-фотона, в световую или электромагнитную энергию.

Разбирая все случаи выделения атомными ядрами энергии, их можно отнести к двум видам преобразования энергии ядра: 1) в кинетическую энергию материальных частиц, которым свойственна энергия (масса) покоя, и 2) в световую энергию, то есть энергию материальных частиц (фотонов), которым не свойственна энергия (масса) покоя. Отсутствие энергии (массы) покоя у световых фотонов, как об этом было сказано ранее, можно усмотреть на основании общей зависимости массы частицы от скорости ее движения. Эта зависимость, данная Эйнштейном, имеет

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}, \text{ где } m \text{ — масса частицы,}$$

движущейся со скоростью v , m_0 — масса покоящейся частицы и c^2 — квадрат скорости света. Из

этого соотношения следует, что $m_0 = m \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$.

Коль скоро фотон всегда движется со скоростью света c , $\frac{v^2}{c^2} = 1$ и m_0 , а следовательно, и энергия

покоя равна нулю. Если произвести необходимые подсчеты, то для ядра урана ${}_{92}\text{U}^{238}$ описанный выше мысленный опыт будет характеризоваться следующими величинами. Для вытаскивания протона из ядра урана и оттягивания его на расстояние 10^{-13} см от поверхности ядра необходимо сообщить энергию в количестве 25,9 Мэв. В последующем энергия выделится в форме кинетической энергии протона в количестве 18,4 Мэв. Итак, тот мысленный опыт, который мы осуществили, заставив человечка вытаскивать протон из ядра, привел к тому, что на вытаскивание

протона из ядра урана надо затратить больше энергии, чем ее выделится в форме кинетической энергии. Это становится понятным, если иметь в виду, что при формировании ядра из соответствующего числа свободных протонов и нейтронов должна выделиться энергия.

Приведенные выше числа заставляют признать, что присоединение протона к ядру сопряжено с выделением $25,9 - 18,4 = 7,5$ Мэв. Очевидно, выделение энергии при формировании атомного ядра, обусловленное проявлением ядерных сил притяжения, имеет своим следствием устойчивость атомного ядра. Действительно, атомное ядро имеет меньше энергии, чем свободные нуклоны, а потому для полного его разрушения, для разделения всех его нуклонов друг от друга ему необходимо сообщить энергию. Если атомному ядру не сообщать извне энергию, то оно само не может из-за недостатка энергии полностью разрушиться. Таким образом, недостаток энергии не позволяет ядру самому разделиться на свободные нуклоны, а потому он может рассматриваться как мера устойчивости атомного ядра. Тот факт, что недостаток энергии атомного ядра по сравнению с энергией его свободных нуклонов является мерой устойчивости атомного ядра, дал основание для названия этого недостатка энергии — энергией связи атомного ядра, поэтому чем больше энергия связи атомного ядра, тем труднее разрушить атомное ядро до разделения всех его нуклонов.

Изучение различными методами сил ядерного взаимодействия между протонами, между нейтронами, а также между протоном и нейтроном привело к признанию, что порядок величины этих сил один и тот же для всех нуклонов, вне зави-

симости от того, являются ли они нейтронами или протонами. К тому же следствию привели опытные факты и теоретические расчеты: например, установлено, что радиус ядра атома R пропорционален кубическому корню из массового

числа (A): $R = 1,5 \cdot 10^{-13} \sqrt[3]{A}$ см, а потому объем ядра равен $v = \frac{4}{3} \pi R^3 = \frac{4}{3} \pi (1,5 \cdot 10^{-13})^3 A$ см³.

Таким образом, оказывается, что объем ядра $v = 1,5 \cdot 10^{-38} A$ см³, то есть объем ядра пропорционален числу нуклонов в ядре, поскольку массовое число A равно числу нуклонов. Следовательно, вне зависимости от того, является ли нуклон нейтроном или протоном прибавление его к ядру увеличивает объем ядра на одну и ту же величину. Пропорциональность объема ядра числу нуклонов позволяет считать, что и энергия связи во всех случаях приближенно пропорциональна числу нуклонов в ядре. Как же оценить величину энергии связи? С целью оценки этой величины необходимо воспользоваться соотношением $E = mc^2$. Выше уже говорилось о том, что изменение массы какой-либо системы отражает собой изменение количества энергии в этой системе. Поэтому, чтобы определить это изменение количества энергии, необходимо просто найти изменение массы. Таким образом, чтобы оценить величину энергии связи атомного ядра, необходимо определить изменение массы, сопровождающее образование данного атомного ядра из соответствующего числа свободных нейтронов и протонов. Выше уже указывалось, что массу изотопа обычно измеряют, используя в качестве единицы $1/16$ часть массы самого легкого природного изотопа кислорода O^{16} . Эта единица в граммах численно равна $1,66 \cdot 10^{-24}$ г.

Для выражения численного значения этой величины в энергетических единицах необходимо выражение ее в граммах умножить на квадрат скорости света $c(2,9977 \cdot 10^{10} \text{ см/сек} \sim 3 \times 10^{10} \text{ см/сек})$; при таком умножении получится значение, выраженное в эргах, а затем это последнее путем умножения на $6,25 \cdot 10^5$ можно выразить в мегаэлектронвольтах (Мэв). Таким образом, получается $1,66 \cdot 10^{-24} \cdot (2,998 \cdot 10^{10})^2$ эрг, или $1,66 \cdot 10^{-24} (2,998 \cdot 10^{10})^2 \cdot 6,25 \cdot 10^5 = 931$ Мэв. Поэтому, если иметь данные о массах изотопов в атомных единицах, или, как говорят, атомные веса изотопов в физической системе, то легко подсчитать изменение массы, точнее уменьшение массы, обусловленное выделением энергии (энергии связи атомного ядра) при образовании данного ядра из свободных нейтронов и протонов. Это уменьшение массы обычно называют дефектом массы. Следовательно, энергия связи атомного ядра, выраженная в мегаэлектронвольтах, равна дефекту массы в атомных единицах, умноженному на 931.

В качестве иллюстрации сказанному произведем вычисление энергии связи для атомного ядра гелия ${}^4_2\text{He}$. В состав этого ядра входят два протона и два нейтрона. Данные об этих частицах приведены ниже:

Частица	Масса при $O^{16} = 16,000$
${}^1_1\text{H}$	1,008131
${}^1_0\text{n}$	1,00895
${}^4_2\text{He}$	4,00386

Необходимо отметить, что обычно в таблицах дают массы не атомных ядер, а соответствующих

нейтральных атомов, то есть атомных ядер, окруженных электронными оболочками.

Так как всякое атомное ядро имеет строго определенное число протонов, то в электронной оболочке соответствующего атома содержится столько же электронов. Также вместо массы протона обычно приводят массу атома водорода, то есть протона и одного электрона. Изменение массы при формировании атомного ядра из протонов и нейтронов с большой точностью равно изменению массы, которое имело бы место при формировании данного атома из атомов водорода и нейтронов. Число электронов в данном атоме равно числу электронов во всех атомах водорода, необходимых для формирования данного атома.

При вычислении дефекта массы численные значения масс электронов сокращаются. Некоторое различие, правда совсем незначительное, результатов вычисления дефекта массы при формировании данного ядра из протонов и нейтронов или при формировании данного атома из атомов водорода и нейтронов может быть за счет неодинаковой энергии связи электронов в данном атоме и в атомах водорода. Вернемся теперь к вычислению дефекта массы для ядра гелия. Согласно сказанному используем значения масс атомов водорода, нейтронов и атома гелия, приведенные выше в таблице. Дефект массы равен: $2 \cdot 1,008131 + 2 \cdot 1,00895 - 4,00386 = 0,030302$.

Дефект массы, выраженный в мегаэлектронвольтах, дает энергию связи ядра гелия $0,030302 \cdot 931 = 27,93$ Мэв ~ 28 Мэв.

Имея в виду, что ядерные силы, действующие между протонами или между нейтронами, одинаковы или во всяком случае одного порядка и что различные атомные ядра отличаются друг от

друга различными числами протонов и нейтронов, то для характеристики энергии связи данного ядра находят отношение энергии связи для всего ядра к общему числу нуклонов ядра. Это отношение называют энергией связи, или средней энергией связи, приходящейся на один

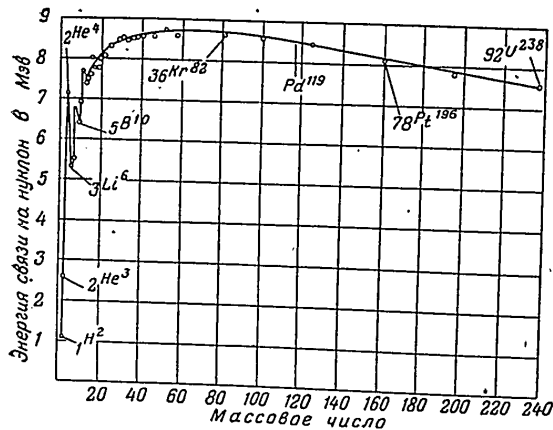


Рис. 16. Средняя энергия связи ядра на один нуклон

нуклон. Так, для ядра гелия энергия связи, приходящаяся на один нуклон, равна $28 : 4 = 7,0$ Мэв. Если для всех встречающихся в природе атомных ядер найти энергию связи, приходящуюся на один нуклон, и отложить ее по оси ординат на координатной плоскости, а по оси абсцисс отложить массовые числа, то есть общие числа нуклонов в ядре, то получится характерная кривая линия, изображенная на рис. 16. Наибольшее зна-

чение ординаты, то есть энергии связи, приходящейся на один нуклон, отвечает атомным ядрам с массовыми числами около 80.

Таким образом, по мере роста массового числа энергия связи, приходящаяся на один нуклон в ядре, вначале возрастает, а затем уменьшается.

Этот факт дает основание наметить по крайней мере два пути практического использования, выделения ядерной энергии. Первый путь, как это легко установить, состоит в соединении легких ядер, или, как часто говорят, в сплавлении легких ядер. Действительно, сравним два атомных ядра с массовыми числами a_1 и a_2 , причем одно из чисел, например, a_2 , в два раза больше первого, а каждое из них меньше, например, 40. Ядру с меньшим массовым числом соответствует и меньшая энергия связи, приходящаяся на один нуклон E_1 , как это видно по ходу кривой вблизи от начала координат и, наоборот, ядру с большим массовым числом соответствует и большая энергия связи на нуклон E_2 . Таким образом, $E_1 < E_2$; общее количество энергии, которое должно выделиться при формировании упомянутых атомных ядер из свободных нуклонов (то есть энергия связи ядер), равно соответственно $a_1 E_1$ и $a_2 E_2$. На основании перечисленных выше условий ясно, что если заставить слиться два атомных ядра с массовым числом a_1 , то возникнет атомное ядро с массовым числом a_2 .

При слипании двух одинаковых атомных ядер, каждое с массовым числом a_1 , должен наблюдаться энергетический эффект, именно выделение энергии. Действительно, по сравнению со свободными нуклонами эти два ядра имеют количество энергии меньше на $2 a_1 E_1$, в то время как ядро с массовым числом a_2 имеет меньше энергии,

также по сравнению со свободными нуклонами, на величину $a_2 E_2$. Но, так как $2 a_1 = a_2$, а $E_1 < E_2$, то $a_2 E_2 > 2 a_1 E_1$. Следовательно, два слипающихся ядра имеют энергии больше, чем должно иметь то ядро, которое возникает из этих двух ядер, а потому избыток энергии, равный $a_2 E_2 - 2 a_1 E_1 = 2 a_1 (E_2 - E_1)$, должен при таком слипании выделиться.

Простейшим примером может служить воображаемый случай образования ядра гелия из двух дейтронов (атомных ядер тяжелого водорода). Действительно, масса атома дейтерия равна 2,014725, масса атома гелия равна 4,00386.

Если бы слиплись два дейтерона, то дефект массы был бы равен $2 \cdot 2,014725 - 4,00386 = 4,029450 - 4,00386 = 0,02559$ и выделенная энергия в мегаэлектронвольтах равна $0,02559 \times 931 = 23,82$ Мэв. Если бы образовался путем слипания дейтронов один грамм-атом гелия ($6,02 \cdot 10^{23}$ атомов), то есть 4,004 г, то должна выделиться энергия в количестве $23,82 \cdot 6,02 \times 10^{23}$ Мэв, или в малых калориях $23,82 \cdot 6,02 \times 10^{23} \cdot 3,83 \cdot 10^{-14}$ кал = $5,45 \cdot 10^{11}$ кал.

Если считать, что при сгорании одного грамма угля выделяется 7000 кал, то приведенный выше энергетический эффект образования 4 г гелия из тяжелого водорода будет равен количеству энергии, выделяющейся при сгорании $\frac{5,45 \cdot 10^{11}}{7 \cdot 10^3 \cdot 10^3} = 84 000$ кг каменного угля.

Таким образом, образование гелия из тяжелого водорода должно сопровождаться огромным энергетическим эффектом. Аналогичных примеров можно привести очень много. Во всяком случае становится очевидным, что при образовании атомных ядер с массовым числом, меньшим 80,

из более легких атомных ядер должна выделяться энергия, и, таким образом, открывается путь практического использования энергии атомных ядер, основанный на слипании легких ядер.

Этот путь использования ядерной энергии нашел практическое применение в водородной бомбе, выделение энергии при взрыве которой связано, например, образованию гелия из более легких атомов: из тяжелого (${}^3_1\text{H}$) и сверхтяжелого (${}^3_1\text{H}$) водорода, то есть из дейтерия, трития или других аналогичных процессов.

Второй путь практического использования энергии атомных ядер может быть намечен при рассмотрении второй части кривой зависимости от массового числа энергии связи атомных ядер, приходящейся на один нуклон. Вторая часть кривой, графически выражающая собой эту зависимость, относится к тяжелым атомным ядрам с массовыми числами больше 80; она характеризует собой постепенное уменьшение энергии связи, приходящейся на один нуклон, по мере увеличения массового числа атомного ядра. Этот факт позволяет предсказать, что при делении тяжелых атомных ядер на две части энергия должна выделяться. Действительно, допустим, ядро атома урана с числом Менделеева 92 и массовым числом 238 разделится на две одинаковые части. Предположение о том, что деление совершается с образованием двух одинаковых «осколков», вовсе не обязательно, оно лишь упрощает выявление указанного выше факта выделения энергии при расщеплении тяжелых атомных ядер.

Итак, допустим, что ядро урана разделится на два одинаковых «осколка». Энергия связи, приходящаяся на один нуклон для материнского элемента E_1 , как это видно из графика на рис. 16,

очевидно, меньше, чем для каждого из получившихся «осколков» E_2 . Обратим теперь внимание на то, что при формировании ядра урана из свободных нуклонов должна выделиться энергия (энергия связи) $238 \cdot E_1$ Мэв, а при формировании обоих «осколков», также из свободных нуклонов, должна выделиться энергия в количестве $2 \cdot \frac{238}{2} \cdot E_2 = 238 \cdot E_2$. Так как E_1 меньше чем E_2 ,

то при формировании обоих «осколков» из свободных нуклонов должно выделиться энергии больше, чем при формировании атомного ядра урана. Поэтому при делении ядра атома урана оба «осколка» в момент их образования имеют энергии больше, чем это соответствует их массовому числу, и поэтому избыток энергии $238 E_2 - 238 E_1 = 238 (E_2 - E_1)$ должен выделяться. Таким образом, деление тяжелых ядер обязательно сопровождается выделением энергии.

Все сказанное выше позволяет наметить два принципиально возможных пути практического использования ядерной энергии; первый из них — слияние наиболее легких атомных ядер и второй — деление наиболее тяжелых атомных ядер. К настоящему моменту в военном деле оба пути нашли практическое осуществление, первый из них — в виде взрыва водородных бомб, а второй — в виде взрывов атомных бомб.

Рассмотрим теперь вопрос о физической сущности явления выделения энергии при делении тяжелых атомных ядер. Если иметь в виду наличие ядерных сил, действующих между нуклонами в атомном ядре, то легко сделать вывод, что атомное ядро может быть уподоблено капле, именно капле ядерной жидкости. В капле обычной жидкости, например, воды между ее молекулами действуют силы молекулярного сцепления, которые являются, как и ядерные силы, близкодeйствующими. Под влиянием этих сил жидкость, будучи предоставлена самой себе, принимает форму шара. Очевидно, также и ядро должно быть сферическим. В чем существенное отличие ядерной жидкости от обычной жидкости в отношении сил, действующих между частицами? Оно заключается в том, что между некоторыми частицами ядерной жидкости, именно протонами, помимо сил притяжения действуют также силы отталкивания электрической природы, что не имеет места между частицами обычной жидкости.

Представим себе атомное ядро разделившимся в некоторый момент на две части под влиянием причин, заложенных в самом ядре, именно в результате борьбы двух противоположных тенденций, присущих ядру (как об этом говорилось выше): тенденции стянуться под действием ядерных сил и тенденции разрушиться под действием сил электрического отталкивания между протонами. Пусть атомное ядро урана разделилось пополам, тогда каждый из «осколков» будет содержать 46 протонов и 73 нейтрона. При делении каждый из «осколков» под действием ядерных сил станет каплей ядерной жидкости, то есть в конце концов станет атомным ядром соответствующего изотопа. Поскольку ядерные силы близкодeйствующие, то в ближайший момент после деления оба «осколка», оказавшись на расстоянии 10^{-13} см (диаметр легкого ядра) друг от друга перестанут притягивать друг друга, в то время как силы электрического взаимодействия как дальнедействующие силы обусловят взаимное отталкивание этих «осколков» и последние начнут двигаться в противоположных направле-

кулами действуют силы молекулярного сцепления, которые являются, как и ядерные силы, близкодeйствующими. Под влиянием этих сил жидкость, будучи предоставлена самой себе, принимает форму шара. Очевидно, также и ядро должно быть сферическим. В чем существенное отличие ядерной жидкости от обычной жидкости в отношении сил, действующих между частицами? Оно заключается в том, что между некоторыми частицами ядерной жидкости, именно протонами, помимо сил притяжения действуют также силы отталкивания электрической природы, что не имеет места между частицами обычной жидкости.

ниях. Электрическое отталкивание вызовет возникновение большой кинетической энергии у обоих «осколков», и они в конце концов будут двигаться с громадными скоростями порядка 10^9 см/сек, то есть порядка 10 000 км/сек. Это взаимное электрическое отталкивание «осколков» друг от друга приводит к преобразованию энергии, первоначально находившейся в скрытой, потенциальной форме в атомном ядре, в энергию электрического поля и затем в явную форму — в кинетическую энергию «осколков», в энергию механического движения. Таким образом, энергия атомного ядра в результате его деления преобразуется в кинетическую энергию «осколков» или, как говорят, энергия атомного ядра при таком делении выделилась. Следовательно, здесь под выделением энергии следует понимать преобразование ее из скрытой, потенциальной формы в кинетическую, т. е. в энергию механического движения.

Одновременно надо иметь в виду, что деление атомного ядра может сопровождаться образованием фотонов (световых частиц), называемых гамма-фотонами, которые могут унести часть энергии. Образование этих фотонов также должно рассматриваться как выделение энергии. Обращаясь вновь к кривой (см. рис. 16), изображающей зависимость между энергией связи, приходящейся на один нуклон, и массовым числом ядра, легко сделать вывод о том, что энергия связи, приходящаяся на один нуклон, для большинства ядер равна 7,5—8,5 Мэв. Это означает, что если к атомному ядру присоединится, например, один нейтрон, то обязательно должна выделиться энергия в количестве, примерно равном 8 Мэв. Если же эта энергия почему-либо не вы-

делится в виде фотонов, то она распределится по всему ядру, т. е. по всем нуклонам в ядре, и ядро будет иметь количество энергии, превышающее то, которое ему надлежит иметь в соответствии с приведенной кривой. Такие атомные ядра, обладающие избыточным количеством энергии по сравнению с обычным их состоянием, называют возбужденными, ибо они, очевидно, должны быть способны к каким-либо процессам, сопровождающимся выделением энергии, в частности, например, к выделению фотонов. Как видно будет из дальнейшего, некоторые тяжелые ядра из-за наличия избыточной энергии, обусловленного поглощением нейтронов, способны к самопроизвольному делению на два «осколка», что дает указание на практическую реализацию второго пути использования энергии тяжелых атомных ядер.

12. УСТОЙЧИВЫЕ И НЕУСТОЙЧИВЫЕ АТОМНЫЕ ЯДРА

Имея в виду наличие двух родов сил, действующих между нуклонами в атомном ядре — сил притяжения между соседними нуклонами и сил отталкивания между протонами, можно сделать вывод о том, что свойства и состояния атомных ядер являются следствием борьбы двух противоположностей в ядре. Жизнь атомного ядра определяется двумя тенденциями; одна из них, обусловленная ядерными силами, вызывает стягивание всех нуклонов, а другая, — возникающая от действия отталкивательных сил, стремится разорвать атомное ядро, разрушить его. Становится понятным, почему для легких атомных ядер отношения числа нейтронов к числу протонов в них примерно равно единице. А для тяжелых

это отношение примерно равно 1,6. Действительно, в случае малых чисел протонов в атомных ядрах ${}^2\text{He}^4$, ${}^6\text{C}^{12}$, ${}^8\text{O}^{16}$, ${}^{10}\text{Ne}^{20}$, ${}^{20}\text{Ca}^{40}$ число нейтронов равно числу протонов. Для тяжелых атомных ядер ${}^{90}\text{Th}^{232}$, ${}^{92}\text{U}^{238}$ числа нейтронов в них 142 и 146 соответственно обуславливают величины отношений чисел нейтронов к числам протонов: $\frac{142}{90} = 1,58 \sim 1,6$; $\frac{146}{92} = 1,585 \sim 1,6$. Для промежуточных значений чисел Менделеева (порядковых номеров) например, для атомных ядер ${}^{45}\text{Rh}^{103}$ (Rh обозначение элемента — родия) это отношение равно $\frac{103-45}{45} = \frac{58}{45} = 1,29$.

Таким образом, по мере увеличения числа протонов в атомных ядрах число нейтронов, приходящихся на один протон, возрастает от 1 до 1,6. Это возрастание обусловлено тем, что с увеличением числа протонов усиливаются отталкивательные силы и для возможности существования атомных ядер необходимо разбавление протонов нейтронами, то есть необходимо, чтобы нейтроны, входящие в ядро, отодвигали бы друг от друга протоны и тем самым ослабляли эффект действия отталкивательных кулоновских сил. Поэтому для каждого числа протонов в ядре, чтобы ядро было вполне устойчивым, должно быть более или менее определенное число нейтронов. В том же случае, если в атомном ядре, возникшем каким-либо образом, числа нейтронов и протонов отклоняются от того отношения их, которое соответствует устойчивости ядра, ядро должно быть неустойчивым. Оно должно путем тех или иных процессов превратиться в другое ядро с таким составом из нейтронов и протонов, который отвечает устойчивому состоянию ядра.

Все вышесказанное позволяет утверждать, что при очень большом числе протонов в ядре отталкивательные силы настолько велики, что при любом числе нейтронов ядро не может быть устойчивым. Так установлено, что все атомные ядра с числом протонов больше 83 ($Z > 83$) являются в той или иной мере неустойчивыми.

Приведенные соображения об устойчивости и неустойчивости атомных ядер находятся в полном соответствии с наблюдаемыми на практике явлениями. Установлено, что в природе встречается около 250 различных изотопов, в отношении которых нет никаких данных о каких-либо превращениях их атомных ядер. Эти атомные ядра являются устойчивыми, и они, очевидно, не способны к каким-либо самопроизвольным превращениям: к ним относятся изотопы водорода ${}^1\text{H}^1$ (99,9844%) и ${}^1\text{H}^2$ (0,0156%), изотопы гелия ${}^3\text{He}^3$ ($1,3 \cdot 10^{-4}\%$) и ${}^3\text{He}^4$ (99,9999%), лития ${}^6\text{Li}^6$ (7,3%) и ${}^7\text{Li}^7$ (92,7%) и т. д. Здесь в скобках указано процентное содержание изотопа в природном элементе.

Наряду с этими устойчивыми изотопами, известно свыше 1100 неустойчивых изотопов, у которых атомные ядра самопроизвольно претерпевают изменения, приводящие к превращению их в другие атомные ядра. Небольшая часть этих изотопов встречается в природе, а остальные могут быть лишь искусственно приготовлены в лабораториях или на заводских установках. Встречающиеся в природе неустойчивые изотопы либо содержатся в природных рудах в ничтожно малом количестве, либо их превращения совершаются настолько медленно, что за геологический период количество изменившихся ядер сравнительно невелико. Те атомные ядра, которые

очень медленно испытывают превращения (U^{238} , Th^{232}), не образуются вновь в земных условиях; те же неустойчивые природные изотопы, которые быстро претерпевают превращения, непрерывно образуются в природе. Эти неустойчивые изотопы, претерпевающие превращения в другие изотопы, называются радиоактивными, а сам факт превращения атомных ядер в другие ядра — радиоактивностью. Встречающиеся в земной коре радиоактивные изотопы называют природными радиоактивными; соответственно радиоактивные изотопы, специально приготовленные, называют искусственно-радиоактивными.

В чем же причина неустойчивости и, с другой стороны, возможности существования радиоактивных изотопов? Таких причин можно усмотреть две, причем обе они являются следствием того, что ядерные силы, стягивающие нуклоны ядра, обеспечивают возможность его существования, а отталкивательные силы электрического происхождения стремятся разрушить ядро.

Одной из причин неустойчивости, особенно вы-
явлено проявляющейся для тяжелых атомных ядер с большим электрическим зарядом, большим числом в них протонов, является отталкивательное взаимодействие между протонами. Очевидно, даже наличие сравнительно большого числа нейтронов в тяжелых атомных ядрах не в состоянии вполне нейтрализовать это отталкивательное взаимодействие между протонами, и поэтому радиоактивные ядра должны перейти в другие, для которых это отталкивательное взаимодействие должно быть меньше.

Другой причиной является несоответствие отношения числа нейтронов в ядре к числу в нем протонов отношению этих чисел для устойчивого

ядра. Оно может быть больше и меньше, вследствие чего в ядре должны произойти такие процессы, которые приведут к изменению чисел в нем нейтронов и протонов, чтобы отношение их отвечало устойчивым ядрам. Как мы увидим в дальнейшем, в зависимости от того, какое число нейтронов в атомном ядре (больше оно того, которое отвечает устойчивому состоянию ядра или меньше), возможны разные типы превращения атомных ядер.

Формально самопроизвольные превращения можно описать с энергетической точки зрения. Прежде всего надо отметить, что самопроизвольные процессы в том или ином атоме или молекуле, то есть те, течение которых вызвано причинами, заложенными в этом атоме или молекуле, а не какими-либо воздействиями извне при низких температурах (теоретически при температуре абсолютного нуля) могут осуществляться лишь с выделением энергии. В силу закона сохранения энергии процесс в атоме или молекуле не может быть самопроизвольным, если для его течения необходимо добавление энергии от внешних систем по отношению к рассматриваемым атому или молекуле. Поэтому, радиоактивное превращение может осуществляться лишь в том случае, если оно сопровождается не увеличением, а уменьшением запаса энергии, сопровождается выделением энергии. Следовательно, исходное покоящееся атомное ядро обязательно должно иметь большее количество энергии, чем те материальные частицы, которые из него образуются, если их рассматривать также покоящимися.

Все сказанное объясняет один из основных законов атомной физики, согласно которому при низкой температуре (чтобы не оказывала влияние

кинетическая энергия атомов и молекул) в атомной системе возможны лишь такие самопроизвольные процессы, которые ее приводят в состояние, отвечающее меньшему запасу энергии. Поэтому можно сказать, что самопроизвольное превращение того или иного атомного ядра возможно лишь в том случае, если оно сопровождается выделением энергии, и, следовательно, представляется в принципе возможным заранее установить, является ли то или иное атомное ядро устойчивым или радиоактивным. Если всякое мысленно возможное для данного атомного ядра превращение должно сопровождаться поглощением извне энергии, то эти превращения в действительности невозможны, и атомное ядро будет устойчивым. Наоборот, если для данного атомного ядра возможно то или иное превращение, сопровождающееся выделением энергии, то ядро может быть радиоактивным, оно может претерпеть превращение.

13. ВИДЫ РАДИОАКТИВНЫХ ПРЕВРАЩЕНИЙ

В настоящий момент установлено существование следующих видов радиоактивных превращений невозбужденных атомных ядер: 1) альфа-распад (α -распад); 2) бета-распад (β -распад в виде β^- -распада и β^+ -распада); 3) K -захват¹ и 4) деление атомных ядер; 5) нейтронный распад (n -распад). В связи с превращением радиоактивных изотопов, с радиоактивным распадом, возникает вопрос о скорости этого превращения, которую, очевидно, надо оценить числом превратившихся атомных ядер в единицу времени. Чем больше в единицу времени, например, в одну

¹ В последнее время K -захват часто стали называть электронным захватом, и его обозначают E -захват.

секунду превратится атомных ядер, тем скорость превращения (скорость распада) больше.

Если иметь в виду малые размеры атомных ядер, даже по сравнению с размером атома, то становится очевидным, что в любом веществе ядра находятся на огромных, по сравнению с их размером, расстояниях друг от друга. Поэтому каждое ядро в любом веществе ведет обособленное существование независимо от существования и состояния других атомных ядер. Эта независимость атомных ядер в любом веществе друг от друга делает понятным основной закон радиоактивного распада, установленный экспериментально: скорость распада пропорциональна наличному числу данных радиоактивных атомных ядер, или иначе, для небольшого промежутка времени число распадающихся атомных ядер пропорционально наличному числу атомных ядер и промежутку времени. Если обозначить для данного момента времени число одинаковых атомных ядер, способных к радиоактивному превращению через N , а промежуток времени через $t_2 - t_1$, где t_1 и t_2 — достаточно близкие моменты времени ($t_1 < t_2$), и число разлагающихся атомных ядер в этот отрезок времени через n , то $n = KN(t_2 - t_1)$. Величина K , то есть коэффициент пропорциональности, носит название константы распада. Если принять разность $t_2 - t_1$ равной единице, т. е. интервал времени наблюдения равным единице, то $K = \frac{n}{N}$ и, следовательно, константа распада показывает долю от наличного числа атомных ядер, испытывающих распад в единицу времени. Следовательно, распад совершается так, что в единицу времени всегда распадается одна и та же доля от налич-

ного числа атомных ядер. Можно показать, что величина K обратна величине средней продолжительности жизни данного радиоактивного изотопа. Часто скорость радиоактивного распада изотопа характеризуют величиной периода полураспада, то есть того интервала времени, в течение которого половина первоначального числа атомных ядер испытает распад. Период полураспада и константа распада K связаны между собой простым числовым соотношением $K = \frac{0,693}{\tau}$. Следовательно, чем больше период полураспада, тем меньше константа и скорость радиоактивного распада. Как константа распада, так и период полураспада являются величинами, характерными для каждого радиоактивного изотопа. Величины периодов полураспада для различных изотопов различны; для некоторых, особенно быстро распадающихся, период полураспада может быть равным миллионным долям секунды, а для некоторых изотопов, как уран 238 и торий 232, он соответственно равен $4,498 \cdot 10^9$ и $1,389 \cdot 10^{10}$ лет. Легко подсчитать число атомов урана 238, испытывающих превращение в данном количестве урана, например, одном килограмме в течение одной секунды. Количество любого элемента в граммах, численно равное атомному весу, содержит, как известно, $6,02 \cdot 10^{23}$ атомов. Поэтому согласно приведенной выше формуле $n = KN(t_2 - t_1)$ найдем число атомов урана, распадающихся в одном его килограмме в одну секунду, имея в виду, что в году 365 суток и сутки содержат 24 часа по 60 минут, а одна минута — 60 секунд,

$$n = \frac{0,693}{4,498 \cdot 10^9 \cdot 365 \cdot 24 \cdot 60 \cdot 60} \cdot \frac{6,02 \cdot 10^{23}}{238} \cdot 1000 = 2 \cdot 10^6.$$

Вычисления приводят к тому, что в одном килограмме урана в течение одной секунды распадается $2 \cdot 10^6$, то есть два миллиона атомов. Несмотря на получившееся огромное число распадающихся атомов, все же скорость превращения ничтожно мала. Действительно, в одну секунду распадается следующая часть урана:

$$\frac{2 \cdot 10^6 \cdot 238}{6,02 \cdot 10^{23} \cdot 1000} = 7,9 \cdot 10^{-19}.$$

Таким образом, из наличного количества урана в одну секунду распадается его доля, равная

$$\frac{7,9}{10\ 000\ 000\ 000\ 000\ 000\ 000}.$$

Обращаясь опять к основному закону радиоактивного распада $n = KN(t_2 - t_1)$, т. е. к тому факту, что из наличного числа атомных ядер в единицу времени распадается всегда одна и та же их доля и, имея к тому же в виду полную независимость атомных ядер в каком-либо веществе друг от друга, можно сказать, что этот закон является статистическим в том смысле, что он не указывает, какие именно атомные ядра подвергнутся распаду в данный отрезок времени, а лишь говорит об их числе. Несомненно, этот закон сохраняет силу лишь для того случая, когда наличное число атомных ядер очень велико. Некоторые из атомных ядер распадутся в ближайший момент времени, в то время как другие атомные ядра будут претерпевать превращения значительно позднее, поэтому когда наличное число радиоактивных атомных ядер сравнительно невелико, закон радиоактивного распада может и не выполняться во всей строгости.

Обращаясь к рассмотрению видов радиоактивных превращений изотопов, необходимо прежде всего иметь в виду, что тот или иной изотоп испытывает определенный тип превращения, то есть один из перечисленных выше видов радиоактивных распадов. Однако экспериментальное исследование радиоактивных превращений изотопов привело к признанию наличия у атомных ядер некоторых изотопов способности испытывать несколько видов превращений. Так, например, изотоп ${}^9\text{F}^{18}$ (фтор 18) испытывает либо β^+ -распад, либо K -захват; для изотопа ${}^{25}\text{Mn}^{52}$ (марганец 52) установлено, что 65% атомных ядер испытывают β^+ -распад, а 35% K -захват; для изотопов ${}^{29}\text{Cu}^{64}$ (медь 64) известно, что 31% атомных ядер испытывают β^- -распад, 15% β^+ -распад, а остальные 54% K -захват; атомные ядра изотопа ${}^{83}\text{Bi}^{212}$ (висмут 212), называемого торием С (ThC) на 33,7% испытывают альфа-распад, а 66,3% β^- -распад. Аналогичных примеров можно привести еще много. Вместе с тем, приходится признать, отвлекаясь от приведенных примеров, что какой-либо один вид превращения является характерным для того или иного изотопа. Даже в случае, если атомные ядра какого-либо изотопа могут испытывать несколько типов превращений, все же один из них чаще проявляется, чем другие, поэтому его и следует считать более характерным для данного изотопа (рис. 17).

Альфа-распад. α -распад — самопроизвольное превращение атомного ядра, состоящее в выделении ядром α -частицы, — ядра атома гелия (${}^2\text{He}^4$), сопровождающееся у некоторых изотопов выделением дочерним ядром одного или нескольких гамма-фотонов (γ -фотонов). Поскольку даже за малый отрезок времени в веществе, содержащем

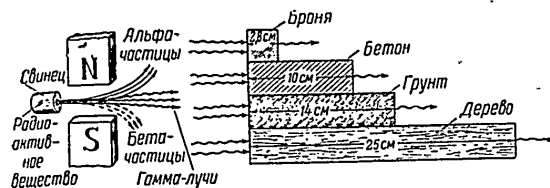


Рис. 17. Состав радиоактивного излучения (слева). Толщина различных материалов, необходимых для ослабления гамма-лучей вдвое (справа)

радиоактивный изотоп, разлагается много атомных ядер, все вылетевшие частицы образуют альфа-лучи, а при выделении гамма-фотонов вещество излучает гамма-лучи. Схема альфа-распада представлена на рис. 18. Здесь, на рисунке,

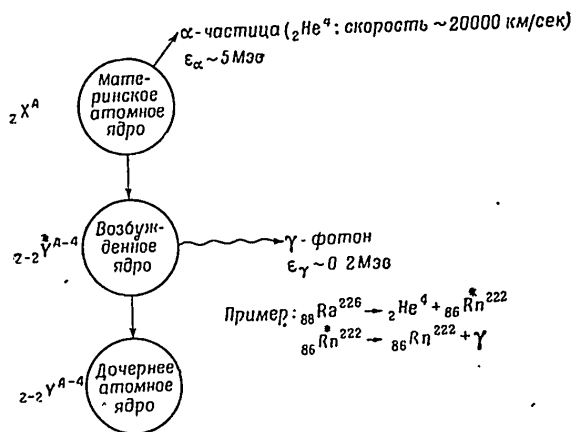


Рис. 18. Схема α -распада

ядро атома изображено кружочком и одной стрелкой показан вылет альфа-частицы, а другой стрелкой — вылет гамма-фотона. Как показали исследования, альфа-частица является ядром атома гелия, и для него обозначение имеет вид ${}^2\text{He}^4$; в состав альфа-частицы входят четыре нуклона, из которых два являются нейтронами, а два — протонами.

Выделение альфа-частицы, то есть ядра атома гелия, следует представлять себе следующим образом. В результате движения нуклонов в атомном ядре под влиянием ядерных и кулоновских сил в некоторый момент ядро отпочковывает альфа-частицу; последняя, отделившись от ядра, скоро перестает испытывать силы притяжения со стороны ядерного остатка и остаются действующими на нее лишь кулоновские силы электрического отталкивания.

Под влиянием этих сил альфа-частица движется все быстрее и быстрее, отдаляясь от ядра со все возрастающей скоростью; на достаточно большом расстоянии от ядра, порядка диаметра атома, когда кулоновские силы перестают быть заметными, альфа-частица движется со скоростью около 20 000 километров в секунду. Начиная двигаться в сторону от атомного ядра, частица накапливает кинетическую энергию, и, таким образом, отдалившись от ядра, она имеет огромную кинетическую энергию, то есть энергию механического движения. Следовательно, отталкивание альфа-частицы от атомного остатка осуществляет превращение скрытой энергии ядра в энергию механического движения альфа-частицы. Исследователи, наблюдая вылет альфа-частицы, назовут это превращение энергии ядра в энергию механического движения, «выделением» ядерной энергии.

96

Одной из очень важных особенностей альфа-распада, в случае если этот распад не сопровождается выделением гамма-фотона, является то обстоятельство, что все атомные ядра данного изотопа выделяют альфа-частицы с одной и той же энергией. Поэтому все альфа-частицы имеют для данного изотопа одну и ту же энергию. В некоторых случаях все альфа-частицы, испускаемые данным изотопом, по величине энергии могут быть разбиты на небольшое число групп, так что в пределах одной группы альфа-частицы имеют одну и ту же энергию.

Для ряда изотопов вылет альфа-частицы сопровождается выделением гамма-фотона. Гамма-фотон представляет собой материальную частицу, по своей сущности аналогичную световым частицам, из которых состоят инфракрасный, видимый, ультрафиолетовый свет и рентгеновские лучи. Каждый фотон, являясь частицей, движется со скоростью света $3 \cdot 10^{10}$ см/сек и к тому же обладает волновыми свойствами, т. е. потоку одинаковых фотонов присуща длина волны λ и частота колебаний ν . Экспериментально и теоретически установлено, что энергия фотона E пропорциональна частоте колебаний ν : $E = h\nu$, где коэффициент пропорциональности h носит название универсальной или мировой постоянной Планка: $h = 6,624 \cdot 10^{-27}$ эрг/сек. Произведение частоты колебаний ν на длину волны λ равно скорости света $\lambda\nu = c$. Поэтому энергию фотона, называемого часто квантом, можно выразить также формулой $E = \frac{hc}{\lambda}$. Гамма-фотон отличается от фотона видимого света (например, желтого) меньшей длиной волны; поэтому энергия гамма-фотона округленно в миллион раз больше энер-

7—563

97

гии фотона желтых лучей. Конечно, это сопоставление крайне упрощено, так как разные гамма-фотоны могут иметь разную энергию, а значит и разную длину волны. Для характеристики гамма-лучей ниже приведена таблица свойств фотонов, отвечающих зеленому свету, рентгеновскому лучу и гамма-лучу.

Частота (число колебаний в 1 сек.)	Длина волны в см	Масса фотона в г	Энергия фотона в эв.	Характер лучей
$6 \cdot 10^{14}$	$5 \cdot 10^{-6}$	$4,35 \cdot 10^{-33}$	2,47	Зеленый свет Рентгеновские лучи Гамма-лучи
$3 \cdot 10^{19}$	10^{-9}	$2,18 \cdot 10^{-23}$	123 000	
$3 \cdot 10^{21}$	10^{-11}	$2,18 \cdot 10^{-26}$	12 300 000	

Если за короткий отрезок времени множество атомов претерпевают распад, сопровождаемый выделением гамма-фотонов, то последние образуют гамма-лучи. В том случае, если выделение α -частицы связано с выделением γ -фотона, то сумма кинетической энергии альфа-частицы, которую она приобрела, отталкиваясь от ядра, и энергии γ -фотона есть величина постоянная для всех распадающихся атомных ядер данного изотопа. Как правило, все α -частицы, вылетающие из атомных ядер одного и того же изотопа, имеют весьма близкие по величине энергии. В случае отсутствия γ -фотонов все альфа-частицы имеют одну и ту же энергию, а в случае выделения фотонов сумма энергии фотона и соответствующей частицы есть также постоянная величина, характерная для данного изотопа. Помимо принципиального различия альфа-частицы и гамма-фотона, заключающегося, например в том, что в отличие от альфа-частицы,

гамма-фотон не имеет массы покоя, альфа-лучи легко задерживаются веществом, чего нельзя сказать о гамма-лучах. В воздухе все альфа-частицы данного радиоактивного изотопа проделывают один и тот же путь, измеряемый несколькими сантиметрами, поэтому говорят о пробеге альфа-частиц в воздухе, характерном для данного изотопа. Тонкий слой стекла или металлической фольги толщиной в 0,05 мм полностью задерживает альфа-лучи.

Невольно возникает вопрос, почему альфа-частица задерживается веществом, в частности, воздухом. Тщательное исследование показало, что альфа-частица, двигаясь в воздухе, сталкивается с молекулами воздуха, например, с молекулами азота, кислорода, водяного пара, углекислого газа и т. д., вызывая их ионизацию, образование из каждой молекулы положительно заряженной и отрицательно заряженной частиц-ионов. В среднем на ионизацию одной молекулы альфа-частица затрачивает 32 эв. Таким образом, альфа-частица, двигаясь в воздухе, тратит свою энергию на ионизацию молекул. Легко подсчитать, что на своем пути альфа-частица, имея энергию, например 4 Мэв или $4 \cdot 10^6$ эв, ионизирует более ста тысяч молекул. Таким образом, альфа-частица в веществе оставляет след в виде множества ионов обоого знака.

Если альфа-частица проделывает в веществе относительно малый путь, то, наоборот, гамма-лучи характеризуются очень большой проникающей способностью. Так, слой воздуха толщиной 250 м ослабляет только в три раза интенсивность гамма-лучей (рис. 17 и 19). Несмотря на большую проникающую способность гамма-лучей в веществе, все же последнее их ослабляет. Так, слой

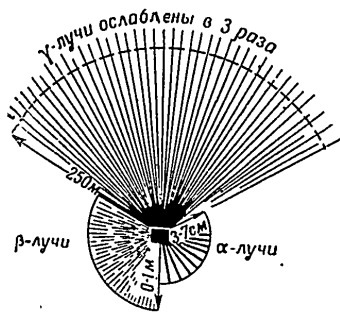


Рис. 19. Схема проникающей способности радиоактивных излучений в воздухе

свинца толщиной 8 см почти полностью задерживает гамма-лучи; для сравнения задерживающей способности свинца по отношению к α -, β - и γ -лучам на рис. 20 схематически изображены слои свинца, либо полностью, либо почти полностью поглощающие радиоактивные излучения. Это ослабление гамма-лучей веществом обусловлено тремя причинами. Во-первых, так называемым фото-эффектом, заключающимся в том, что гамма-фотон в веществе может натолкнуться на тот или иной атомный электрон, передать ему свою энергию и, таким образом, превратиться в электрическое поле, окружающее соответствующее атом-

α -лучи	0,001 мм
β -лучи	0,1 мм
γ -лучи	7 см

Рис. 20. Схема задерживающей способности слоев свинца по отношению к радиоактивным лучам

100

ное ядро. Электрон, приобретя энергию фотона, во много раз превышающую его энергию связи (энергию ионизации, т. е. энергию, необходимую для отделения от атома, обычно измеряемую несколькими электронвольтами), вылетит из молекулы вещества и на своем пути будет разрушать другие молекулы вещества, образуя из них отрицательно и положительно заряженные частицы (отрицательные и положительные ионы).

Вторая причина ослабления гамма-лучей веществом заключается в том, что гамма-фотон, столкнувшись с тем или иным атомным электроном, передает ему часть энергии. Последний, приобретя кинетическую энергию, вырывается из электронной оболочки атома (или молекулы) и, двигаясь в веществе с большой скоростью, будет на своем пути разрушать много молекул вещества, образуя из каждой в форме «осколков» положительно и отрицательно заряженные части молекул — ионы.

Гамма-фотон, отдав часть своей энергии, превращается в другой фотон, который под некоторым углом к направлению движения первоначального фотона будет также двигаться в веществе, опять-таки сталкиваясь с электронами, освобождая их и т. д. Таким путем в веществе в разных местах будут освобождаться электроны. Отклонение фотона от направления движения первоначального фотона называется рассеянием гамма-фотона, или эффектом Комптона.

Наконец, третьей причиной ослабления гамма-лучей в веществе является так называемое образование пары частиц (электрона и позитрона). Гамма-фотон, если его энергия больше 1,02 Мэв, в непосредственной близости к атомному ядру может превратиться в электрон и позитрон. Если электрон является материальной частицей, несущей

101

щей отрицательный электрический заряд, то позитрон — материальная частица, несущая положительный заряд, равный по абсолютной величине заряду электрона. Масса и все остальные его свойства за исключением знака заряда такие же, как и у электрона. Таким образом, в веществе под влиянием гамма-лучей образуются поток электронов и поток позитронов.

Поток электронов, как уже говорилось выше, будет ионизировать вещество, разрушать его молекулы. Позитрон, двигаясь в веществе, может столкнуться с атомным электроном и тогда оба они превратятся в гамма-фотон с энергией 1,02 Мэв. Этот фотон, двигаясь в веществе, испытывает явление фото-эффекта, или комптон-эффекта, что обусловит собой освобождение электронов.

Итак, гамма-лучи, проходя сквозь вещество, под влиянием различных причин вызовут поток электронов, который будет разрушать молекулы и вызывать образование ионов. Поэтому гамма-лучи, проходя сквозь живой организм, внутри него образуют поток электронов, который на своем пути разрушает белковые молекулы, «Осколки» этих молекул являются чужеродными для организма, и в то же самое время для него весьма токсичны.

Главным образом гамма-лучи действуют разрушающе на кровеносные органы, вследствие чего человек, облученный интенсивными гамма-лучами, может заболеть лейкозом. Кроме того, необходимо учесть, что в человеческом организме содержится значительное количество воды. Установлено, что под действием гамма-лучей в воде образуется перекись водорода (H_2O_2). Поэтому в человеческом организме при облучении его гамма-лучами во всех органах возникает перекись

102

водорода. Наличие перекиси водорода во всех частях организма не может не сказаться отрицательно на отправлениях его жизненных функций.

Для оценки интенсивности гамма-лучей принята единица измерения, называемая рентгеном. Один рентген есть то количество гамма-лучей, которое вызывает в 0,001293 г воздуха (вес одного миллилитра сухого воздуха, то есть без водяного пара) при температуре нуль градусов ($t = 0^\circ$) и давлении, равном 760 мм ртутного столба ($P = 760$ мм рт. ст.), образование положительно и отрицательно заряженных ионов, несущих электростатическую единицу количества электричества каждого знака.

Один рентген гамма-лучей образует в 1 г воздуха $1,61 \cdot 10^{12}$ пар ионов (каждая пара состоит из положительно заряженного иона и отрицательно заряженного иона), что соответствует поглощению 83,8 эргов энергии. Сопоставляя альфа- и гамма-лучи, можно сказать, что альфа-лучи из-за легкого их поглощения веществом не представляют особой опасности.

Правда при непосредственном соприкосновении радиоактивного вещества, испускающего альфа-лучи, с поверхностными тканями человеческого организма, например кожей, альфа-лучи могут вызвать сильные раздражения, обычно завершающиеся долго не заживающей язвой. Поэтому попадание альфа-радиоактивного вещества внутрь организма может вызвать сильные болезненные нарушения деятельности тех или иных органов человека.

Плотный лист толстой бумаги, тонкие металлические листы полностью задерживают альфа-лучи. Когда в зарубежной литературе пишут о боевых радиоактивных веществах, то под этим названием

103

подразумевают во всяком случае не альфа-радиоактивные изотопы.

Гамма-лучи из-за большой проникающей способности и оказываемого ими разрушительного действия на ткани организма представляют собой главную опасность для человеческого организма.

Боевыми радиоактивными веществами называют специально приготовленные радиоактивные смеси в виде жидкостей и порошков; ими могут быть снаряжены авиационные бомбы, ракеты, реактивные мины. БРВ называют такие изотопы, которые испускают гамма-фотоны с большой энергией.

Каковы же последствия действия радиоактивных излучений на человеческий организм? Заряженные частицы, как бета- и альфа-частицы, вследствие малой проникающей способности вызывают лишь местную ионизацию в месте их попадания в ткань организма. Наоборот, гамма-лучи, проходя сквозь организм, вызывают ионизацию в различных его частях, что влечет за собой болезнетворные явления (лучевая болезнь).

Биологическое действие на организм излучений, обладающих большой энергией, значительно сильнее, чем это можно было бы предполагать, судя по величине поглощенной энергии организмом. Так, один рентген гамма-излучения производит $1,6 \cdot 10^{12}$ пар ионов и вызывает появление в одном грамме сухого воздуха 83,3 эргов теплоты. В живой ткани выделение энергии вследствие поглощения гамма-лучей будет равно примерно 90 эргам на грамм на один рентген, то есть $2 \cdot 10^{-6}$ кал. Облучение человека излучением в 1000 рентген вызвало бы у него наверняка тяжелое заболевание, однако повышение темпера-

туры, обусловленное поглощением гамма-лучей, равнялось бы всего 0,002°.

Каковы же формы проявления облучения большими дозами гамма-лучей человеческого организма? Основные виды перечислены ниже: 1) лейкопения (уменьшение числа белых кровяных шариков); 2) эпиляция (выпадение волос); 3) бесплодие; 4) мутация (изменение наследственности у потомства); 5) рак; 6) костный некроз (разрушение и отмирание костей).

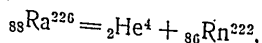
Уменьшение числа белых кровяных шариков является одним из первых признаков облучения большими дозами гамма-излучения. Давно уже известно, что рентгеновские лучи вызывают выпадение волос и их использовали для удаления лишнего волос, хотя это и не всегда проходило без вреда для организма. В некоторых случаях волосы вновь могут вырасти спустя некоторое время, однако облысение может остаться и постоянным. Одним из разительных последствий взрывов атомных бомб над городами Нагасаки и Хиросима явилось облысение многих жителей этих городов, подвергшихся облучению гамма-радиацией, возникшей при взрыве атомной бомбы и от радиоактивных «осколков», образовавших радиоактивную пыль.

Какова же должна быть защита от гамма-лучей? Исследования поглощения гамма-лучей веществами показали, что последние только тогда оказывают эффективное поглощение, если в их состав входят элементы с большими порядковыми номерами (числами Менделеева). Из этих элементов практическое значение имеют в связи с их легкой доступностью свинец (№ 82) и барий (№ 56). Наиболее эффективное поглощение гамма-лучей происходит в свинце, поэтому

для защиты от гамма-лучей в соответствующих лабораториях применяют свинцовые бруски, из которых складывают защитные стенки. На атомных заводах, судя по данным зарубежной печати, в качестве защиты от гамма-лучей используют толстые стенки из бариевого цемента.

В заключении рассмотрения альфа-распада необходимо остановиться на разборе какого-либо частного примера. Следует иметь в виду, что альфа-распад испытывают, как правило, лишь тяжелые атомные ядра с большим порядковым номером, свыше 82. Известно лишь несколько изотопов с меньшим порядковым номером, претерпевающих альфа-распад: ${}_{62}\text{Sm}^{152}$, ${}_{79}\text{Au}^{190}$, ${}_{80}\text{Hg}^{195}$ и, кроме того, изотопы гадолиния и диспрозия. Необходимо подчеркнуть, что лишь для изотопа ${}_{62}\text{Sm}^{152}$ убедительно доказан его альфа-распад, а для остальных нет еще окончательной в этом уверенности.

В качестве примера изотопа, претерпевающего альфа-распад, можно привести изотоп радия ${}_{88}\text{Ra}^{226}$, изотоп с порядковым числом 88 и массовым числом 226. При альфа-распаде из исходного атомного ядра образуется другое ядро с порядковым номером 86, ибо из 88 положительных зарядов исходного ядра два уносит с собой альфа-частица, то есть ядро атома гелия ${}_{2}\text{He}^4$. Очевидно, массовое число получившегося атомного ядра будет на четыре единицы меньше массового числа атомного ядра радия, поскольку альфа-частица содержит четыре нуклона (два протона и два нейтрона), а исходное ядро 226 нуклонов. Таким образом, альфа-распад изотопа радия 226 можно записать с помощью введенных выше обозначений



поскольку получившееся атомное ядро содержит 86 положительных зарядов, то, очевидно, оно соответствует новому элементу, именно радону Rn.

Рассматривая эту запись альфа-распада, легко видеть, что она отображает собой превращение атомного ядра радия в два атомных ядра, именно в ядро атома гелия и ядро атома радона. Следовательно, альфа-распад есть самопроизвольное превращение атома радия в атом гелия и атом радона. Таким образом, описанный процесс есть превращение одного химического элемента — радия в два других — гелий и радон. Если элемент радий в свободном виде является при обыкновенной температуре твердым металлом, легко вступающим в химические реакции со многими веществами: водой, кислотами, серой, хлором, бромом и т. д., является весьма химически активным веществом, то образующиеся из него два элемента: гелий и радон являются химически инертными газами. Кстати, надо отметить, что гелий является устойчивым элементом, а радон радиоактивным. Как и радий, он испытывает самопроизвольный радиоактивный альфа-распад, превращаясь в свою очередь в гелий и элемент полоний.

Для характеристики альфа-распада радия отметим, что для него период полураспада 1622 года и каждая вылетающая при распаде альфа-частица имеет энергию 4,793 Мэв. Выделяющийся при распаде атома радия 226 фотон имеет энергию 0,188 Мэв. Имея в виду, что в 226 граммах радия содержится $6,02 \cdot 10^{23}$ атомов, найдем с помощью величины периода полураспада число атомов, распадающихся в одну секунду в одном грамме радия.

На основании приведенного выше соотношения

между периодом полураспада τ и константой распада K : $K = \frac{0,693}{\tau}$ решим поставленный вопрос.

Как уже упоминалось выше, константа распада показывает долю исходного числа атомов радиоактивного элемента, испытывающую распад в единицу времени. Если в качестве единицы времени брать одну секунду, то константа распада равна

$$K = \frac{0,693}{1622 \cdot 365 \cdot 24 \cdot 60 \cdot 60}$$

Следовательно, в одном грамме радия в одну секунду распадется следующее число атомов $\frac{226 \cdot 1622 \cdot 365 \cdot 24 \cdot 60 \cdot 60}{6,02 \cdot 10^{23} \cdot 0,693} = 3,7 \cdot 10^{10}$ атомов. Если иметь в виду, что в течение многих лет радий был единственным доступным радиоактивным веществом, находившим из-за своей радиоактивности практическое применение, то становится ясным, почему число распадов в одну секунду в одном грамме радия стали использовать в качестве единицы радиоактивности и называть эту единицу кюри.

Способность к радиоактивному распаду, характеризующую число распадов в одну секунду, называют в настоящее время активностью и ее измеряют числом кюри или тысячных долей кюри — милликюри. Таким образом, активность какого-либо радиоактивного вещества, измеренная числом кюри или милликюри, в конечном счете показывает число распадающихся атомов в одну секунду.

Бета-распад. β -распад проявляется в двух формах: бета-минус распад (β^- -распад) и бета-плюс распад (β^+ -распад). Первый из них, β^- -распад, является самопроизвольным превращением атом-

ного ядра, заключающимся в выделении ядром β^- -частицы, то есть электрона. Не для всех бета-активных изотопов, но для некоторых при выделении ядром электрона ($-1e^0$) сначала образуется новое ядро (возбужденное), которое затем выделяет гамма-фотон (или несколько гамма-фотонов).

Выделение фотонов, одного или нескольких, после излучения атомным ядром β -частицы, образовавшимся новым ядром носит название высвечивание ядра. Новое ядро может обладать повышенным количеством энергии по сравнению с устойчивым ядром того же состава и поэтому оно переходит в последнее, излучая избыток энергии с гамма-фотоном; как упоминалось, новое ядро с повышенным значением энергии называется возбужденным. Если возбужденное ядро может пребывать некоторое время в этом состоянии, то оно и соответствующее устойчивое ядро называются изомерами. Таким образом, возбужденный изомер путем высвечивания переходит в устойчивый изомер. Факт существования изомеров носит название изомерии; это явление было открыто академиком И. В. Курчатовым на примере изотопа ^{80}Br .

Как будет сказано дальше, β^- -распад сопровождается выделением нейтральной частички — нейтрино. Схематически β^- -распад изображен на рис. 21. Если за короткий отрезок времени много атомов испытывает β^- -распад, то все бета-частицы (электроны) образуют бета-лучи и в случае выделения гамма-фотонов последние образуют гамма-лучи. О природе и свойствах гамма-лучей говорилось выше. Обратим свое внимание на природу бета-лучей. Прежде всего в отличие от альфа-лучей, в которых все альфа-частицы дви-

гаются с одной и той же скоростью, электроны в бета-лучах движутся с различными скоростями. Это обстоятельство стоит в связи с тем, что разные атомные ядра испускают электроны с различной энергией, то есть электроны, движущиеся с разной скоростью.

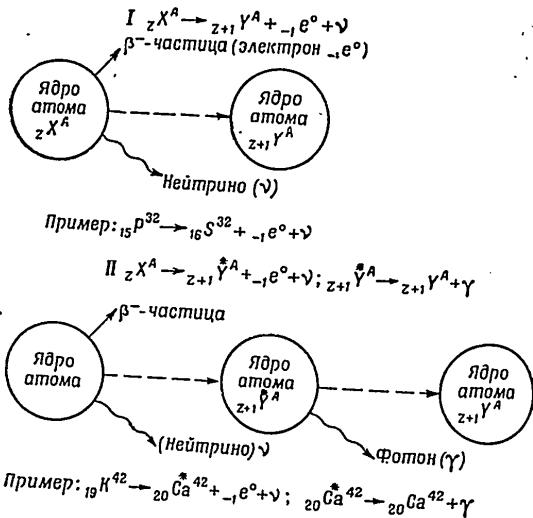


Рис. 21. Схема β^- -распада

Так как все исходные атомные ядра имеют одинаковые запасы энергии и получающиеся в результате бета-распада новые атомные ядра также имеют одну и ту же энергию, то каждое ядро при бета-распаде должно выделить определенное количество энергии, равное разности запасов энер-

гии исходного ядра и получающегося ядра. Так как от разных ядер при бета-распаде вылетают электроны с разной энергией, то очевидно, часть энергии уносят с собой другие вылетающие при распаде ядер частицы, именно нейтрино. Таким образом, при распаде ядра часть энергии уносит с собой электрон, а часть энергии — нейтрино, так что сумма этих энергий есть величина строго определенная для данного радиоактивного изотопа.

Поскольку непосредственно частица нейтрино экспериментально пока не обнаружена, то считают, что она должна обладать такими свойствами, которые затрудняют ее обнаружение опытным путем; прежде всего она не должна ионизировать воздух, то есть должна быть нейтральная, должна иметь очень малую массу, во всяком случае много меньшую массы электрона. В настоящее время полагают, что она, как и фотон, в отличие от электрона не только не имеет электрического заряда, но что и масса покоя, то есть величина массы, в случае если бы нейтрино не имел скорости, равна нулю. Таким образом, полагают, что нейтрино по своим свойствам как бы занимает промежуточное положение между фотоном и нейтроном, тем более что косвенные опыты подтверждают вылет нейтрино при бета-распаде и что ей присущи свойства, характерные для такой частицы, как нейтрон.

Итак, при бета-распаде из атомного ядра вылетают две частицы: электрон и нейтрино, и сумма их энергий строго определенная величина, характерная для данного радиоактивного изотопа. Таким образом, разные атомные ядра одного и того же изотопа выбрасывают электроны с разной энергией, также и нейтрино с разной энер-

гией; наличие в бета-лучах электронов с разной энергией называют непрерывным спектром бета-частиц. Энергии электронов в бета-лучах могут быть очень близкими между собой и могут очень существенно отличаться по величине друг от друга.

Если вылетающая частица — нейтрино — уносит с собой очень малое количество энергии, то

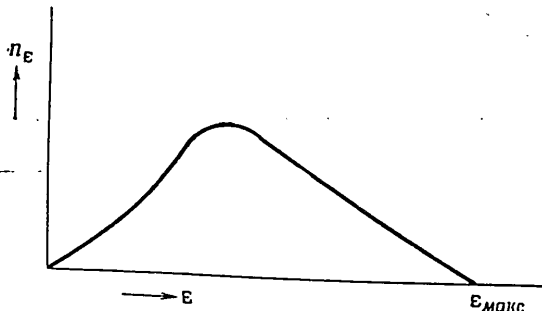


Рис. 22. Кривая распределения β -частиц по энергиям при β -распаде

почти всю энергию уносит с собой электрон и наоборот. Поэтому энергия электрона в бета-лучах по величине должна находиться в пределах от нуля до некоторого максимального значения $E_{\text{макс}}$.

Если все сказанное изобразить графически на плоскости, откладывая на координатной системе по оси абсцисс величины энергии E , а по оси ординат число электронов с данной энергией, то получится кривая линия, изображенная на рис. 22.

112

Все сказанное весьма существенно потому, что при изучении действия бета-лучей на вещество необходимо учитывать наличие в них электронов с разной энергией. Кроме того, обычно в справочных руководствах при указании энергии бета-частиц, образующихся при бета-распаде того или иного изотопа, приводят их максимальную энергию $E_{\text{макс}}$. Следует иметь в виду, что весьма часто для характеристики бета-лучей приводят среднюю энергию бета-частиц, равную примерно одной трети максимальной энергии. Говоря о максимальной энергии бета-частиц в бета-луче, образуемом при бета-распаде того или иного изотопа, следует отметить, что эта величина является характерной для данного изотопа. Очевидно, что для разных изотопов она может быть весьма различна. Так, просматривая максимальные энергии бета-частиц для разных изотопов, можно установить, что для одних она является малой величиной, а для других очень большой, например, 17 Мэв.

Выше уже указывалось, что электроны с разной энергией движутся с разной скоростью и поэтому имеют разные массы. В качестве иллюстрации ниже приведена таблица свойств бета-частиц (электронов), движущихся с разной энергией. В этой таблице масса покоящегося электрона обозначена через m_0 , а скорость света — c ($c \sim 3 \cdot 10^{10}$ см/сек).

Энергия бета-частицы в Мэв	Масса бета-частицы	Скорость бета-частицы
0,1	$1,2 m_0$	0,55 c
1	$3 m_0$	0,94 c
16	$31,6 m_0$	0,9995 c

8-563

113

Как видно из данных таблицы, бета-частицы с энергией 16 Мэв имеют скорость, весьма близкую к скорости света. Изучение действия бета-лучей на вещество прежде всего начинают с определения проникающей их способности сквозь это вещество. Оказалось, что в отличие от альфа-лучей, которые проходят сквозь слой воздуха обычно в несколько сантиметров, бета-лучи обладают значительно большей проникающей способностью; наиболее быстрые бета-частицы проходят слой воздуха в несколько метров.

Конечно, надо иметь в виду, что из-за неоднородности скоростей бета-частиц в бета-луче ослабление последнего при прохождении сквозь слой воздуха происходит постепенно и лишь самые быстрые электроны проходят наибольший путь.

Если путь альфа-частицы в воздухе прямолинейен, то из-за малости массы электрона путь его в воздухе искривлен и представляет собой извилистую линию. Внимательное экспериментальное изучение следа бета-частиц в веществе, их пути в нем, показало, что из-за искривленности пути длина его в 2—4 раза больше толщины слоя вещества, пронизанного бета-лучом.

Почему же воздух задерживает бета-лучи? Оказывается, бета-частица, двигаясь в веществе, встречает на своем пути его молекулы и вызывает их ионизацию. Таким образом, бета-частица постепенно теряет свою энергию, и ее след, например, в воздухе состоит из множества пар ионов. Ионизирующая способность бета-частицы значительно меньше, потому она и прodelывает больший путь в воздухе, чем альфа-частица. Поскольку проникающая способность бета-частиц сквозь вещество невелика, то тонкий слой металла, например толщиной 1 мм, или даже слой

стекла также в 1 мм в большинстве случаев полностью задерживают бета-лучи. Поэтому последние не представляют собой опасности для живых организмов, поскольку от этих лучей легко защититься плотными слоями каких-либо веществ. Однако попадание больших доз бета-активных элементов внутрь организма может оказать сильное болезнетворное действие, поскольку образующие ими бета-лучи будут разрушать молекулы тканей, из-за чего нарушится нормальное функционирование организма. При попадании бета-частиц с энергией 1 Мэв на кожу живого организма они будут проникать внутрь тела только на глубину 5 мм, а вторичные электроны с энергией 1000 эв потеряют свою энергию на еще меньшем расстоянии. Следовательно, опасности воздействия бета-лучами от внешних источников будет подвергаться только тонкий поверхностный слой живой ткани.

Отмечая задерживающую способность бета-лучей веществом за счет ионизации молекул вещества, необходимо указать также на то, что бета-частица, двигаясь в веществе, испытывает влияние электронных оболочек атомов, которое может вызвать отклонение ее движения от прямолинейного, что повлечет за собой изменение скорости по направлению. В учении об электричестве в качестве одного из законов движения электрических зарядов является утверждение, что электрический заряд, двигаясь с переменной скоростью, должен излучать электромагнитные волны, в частности рентгеновские лучи. Поэтому бета-частица, как отрицательно заряженная частица, двигаясь в веществе по искривленному пути, будет излучать рентгеновские лучи, растрчивая на это излучение свою энергию, вследствие чего ее кине-

тическая энергия будет уменьшаться, а следовательно, ее скорость по абсолютной величине также уменьшается.

Это обстоятельство объясняет, почему излучаемые бета-частицей рентгеновские лучи называются лучами торможения. Таким образом, задерживающая способность вещества по отношению к бета-лучам, с одной стороны, обусловлена ионизацией молекул вещества, а с другой стороны, — образованием лучей торможения. Потеря энергии бета-лучами на ионизацию молекул $\Delta E_{\text{ион}}$, вообще говоря, значительно больше, чем потеря ими энергии на образование лучей торможения $\Delta E_{\text{тор}}$. Отношение этих величин с достаточной точностью может быть оценено по формуле

$$\frac{\Delta E_{\text{тор}}}{\Delta E_{\text{ион}}} \approx \frac{ZE}{820},$$

где Z — порядковый номер элемента, а E — энергия бета-частиц в мегаэлектронвольтах. Так, для случая свинца $Z = 82$ и для энергии бета-частиц в 10 Мэв

$$\frac{\Delta E_{\text{тор}}}{\Delta E_{\text{ион}}} \approx 1.$$

Для легких элементов, как алюминий ($Z = 13$), и в случае сравнительно небольших энергий бета-частиц, например $E = 2$ Мэв $\frac{\Delta E_{\text{тор}}}{\Delta E_{\text{ион}}} = \frac{13,2}{820} = 0,03$, то есть $\Delta E_{\text{тор}}$ составляет всего около 3% от потери энергии на ионизацию. Теоретические и экспериментальные исследования поглощения бета-лучей веществом привели к тому, что потеря энергии на ионизацию слоем вещества оказалась пропорциональной количеству вещества, выраженному в граммах, приходящемуся на один ква-

дратный сантиметр поверхности слоя. Поэтому чем больше удельный вес вещества, тем выше его поглощательная способность относительно бета-лучей.

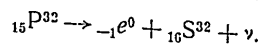
Обратим теперь свое внимание на нейтрино, образующееся при бета-распаде. Выше уже были описаны некоторые свойства нейтрино и отмечалось отсутствие заряда у этой частицы. Это обстоятельство обуславливает собой, как говорилось выше, отсутствие ионизирующей способности нейтрино при прохождении сквозь вещество. Поставленные опыты по изучению прохождения нейтрино сквозь воздух показали, что нейтрино образует лишь одну пару ионов на пути в несколько сот километров в воздухе. Эти опыты подтвердили, что нейтрино почти не ионизирует вещество, и, следовательно, обладает огромной проникающей способностью, поэтому для нейтрино не существует преград, и при прохождении сквозь вещество нейтрино не вызывает в нем каких-либо изменений. При прохождении сквозь живой организм нейтрино не может вызывать болезнетворных явлений и потому не представляет опасности для человеческого организма. Отмеченная огромная проникающая способность нейтрино сквозь вещества показывает, что последние для нее являются совершенно прозрачными; этот факт существенно отличает поток нейтрино от гамма-лучей, с одной стороны, а с другой — от потока нейтронов.

Обратимся теперь к выяснению физической сущности бета-распада на каком-либо конкретном примере. Прежде всего отметим, что понятие о периоде полураспада и измерение активности вещества с помощью введенной выше единицы — кюри имеет полную силу. Так для изотопа ${}_{15}\text{P}^{32}$

(фосфор 32), испытывающего β^- -распад, период полураспада равен 14,295 дня; максимальная энергия вылетающих бета-частиц равна 1,7 Мэв. С помощью введенной выше символики запишем схему распада фосфора 32.

Предварительно отметим лишь, что поскольку фосфор имеет порядковый номер 15, то его атомное ядро имеет 15 положительных зарядов и при его бета-распаде из ядра должен удалиться один отрицательный заряд (бета-частица) и потому остаточное ядро должно уже иметь 16 положительных зарядов, и, следовательно, оно должно быть ядром атома элемента с порядковым номером 16 — серы (${}_{16}\text{S}$).

Электрон, т. е. бета-частица, имеет очень малую массу 0,00055, и ей отвечает массовое число 0, и потому, вылетая из ядра, она не меняет массового числа ядра, так что образующееся ядро атома серы тоже должно иметь массовое число 32. Таким образом, при бета-распаде из данного атомного ядра образуется другое атомное ядро с тем же массовым числом, но зарядом большим на единицу по сравнению с исходным ядром. Вылет нейтрино не меняет ни заряда, ни массового числа атомного ядра. Если иметь в виду обозначение бета-частицы ${}_{-1}e^0$ и нейтрино ν , то схему распада P^{32} следует написать в виде



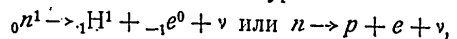
Легко видеть, что бета-распад является формой самопроизвольного превращения химических элементов, в данном случае фосфора в серу. Рассмотрим теперь на приведенном примере бета-распада вопрос о том, каким образом атомное ядро, состоя из протонов и нейтронов, все же выделяет

бета-частицу, т. е. электрон, не входящий в состав атомного ядра. Чтобы выяснить этот вопрос, обратимся к составам исходного ядра и получающегося ядра, имея в виду, что массовое число изотопа является суммой числа нейтронов и числа протонов.

Состав ядра ${}_{15}\text{P}^{32}$	Состав ядра ${}_{16}\text{S}^{32}$
Число протонов — 15 Число нейтронов — 17	Число протонов — 16 Число нейтронов — 16

Сопоставляя составы обоих атомных ядер, мы можем заключить, что в образующемся ядре (${}_{16}\text{S}^{32}$) число нейтронов уменьшилось на единицу, а число протонов, наоборот, увеличилось на единицу по сравнению с исходным ядром ${}_{15}\text{P}^{32}$. Отсюда мы можем заключить, что β^- -распад является превращением нейтрона в протон с выделением электрона (бета-частицы) и нейтрино. На этом примере мы видим одно из любопытных явлений атомной физики. Как протон, так и нейтрон являются элементарными частицами, т. е. не состоящими из других частиц, но вместе с тем могущими переходить один в другой, в данном случае нейтрон может переходить в протон и электрон, не состоя в то же время из протона и электрона. Эта сторона бета-распада вскрывает нам особенности мельчайших частиц материи, и мы вынуждены признать наличие у материи, находящейся в форме элементарной частицы, способности перевоплощаться в другую материаль-

ную частицу. Схему превращения нейтрона в протон можно написать в виде уравнений



если протон ${}_1H^1$ обозначить буквой p . Таким образом, бета-распад любого бета-активного изотопа является следствием превращения в атомном ядре одного нейтрона в протон и электрон, сопровождающегося выбросом нейтрино.

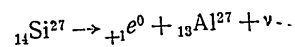
Невольно возникает вопрос о том, возможен ли самопроизвольный переход свободного (вне ядра) нейтрона в протон и электрон. Ответ на этот вопрос можно получить, если воспользоваться общим законом атомной физики, что тот или иной процесс возможен, если он сопровождается выделением энергии. Чтобы решить вопрос об энергетическом эффекте превращения нейтрона в протон и электрон, необходимо найти дефект массы. Как известно, массы нейтрона, протона и электрона соответственно равны 1,00895, (1,008131—0,000548) и 0,000548. Приведенная величина в скобках 1,008131 является массой атома водорода, которая почти в точности равна сумме массы протона и электрона, поскольку атом водорода состоит из протона и одного электрона.

Приведенные численные значения масс относятся к покоящимся частицам. Выше уже упоминалось, что масса покоя нейтрино, вероятно, равна нулю, но во всяком случае не больше пяти сотых массы покоя электрона, поэтому в расчет ее принимать не следует. Дефект массы равен $1,00895 - (1,008131 - 0,000548) = 0,000548 = 1,00895 - 1,008131 = 0,00082$. Таким образом, дефект массы положителен и, будучи выражен в обычных энергетических единицах, например в мегаэлектронвольтах, равен $0,00082 \cdot 931 = 0,76$ Мэв.

Поскольку превращение нейтрона в протон должно сопровождаться выделением энергии 0,76 Мэв, то этот процесс возможен. Действительно установлено, что свободный нейтрон переходит в протон и электрон, он бета-радиоактивен с периодом полураспада 12,8 мин.

Другой формой бета-распада является β^+ -распад, состоящий в выделении ядром положительно заряженного электрона — позитрона и нейтрино. При этом исходное ядро не меняет своего массового числа и из него образуется другое ядро с тем же массовым числом, но с порядковым номером, меньшим на единицу. β^+ -распад в основных чертах повторяет собой β^- -распад, отличаясь лишь тем, что позитрон, вылетевший при распаде, проходя сквозь вещество, встречается в нем с электроном и оба превращаются в гамма-фотоны. Все, что говорилось выше о скоростях β^- -частиц, о возможности выделения гамма-фотона при бета-распаде ядра, о применимости единицы измерения активности кюри, об оценке измерения скорости бета-распада величиной периода полураспада, сохраняет свою силу и для β^+ -распада.

Разберем теперь вопрос о сущности β^+ -распада на конкретном примере превращения изотопа кремния 27 (${}_{14}Si^{27}$). Этот изотоп испытывает β^+ -распад, — его атомное ядро выбрасывает позитрон (${}_{+1}e^0$), превращаясь в ядро с положительным зарядом, равным 13, следовательно, в ядро изотопа алюминия с массовым числом 27.



Определяя дефект массы для этого процесса, можно найти максимальную энергию вылетевшего позитрона. Массы покоя атомов кремния,

алюминия и позитрона соответственно равны 26,9949, 26,9899 и 0,000548. Если иметь в виду, что в атоме кремния и алюминия содержится 14 и 13 электронов соответственно, то дефект массы можно найти следующим образом: $(26,9949 - 14 \cdot 0,000548) - 0,000548 - (26,9899 - 13 \cdot 0,000548) = 26,9949 - 26,9899 - 2 \cdot 0,000548 = 0,0039$ атомных единиц.

Умножив полученный дефект массы 0,0039 на переводный множитель 931, получим количество энергии, выделяемой в процессе превращения ядра (в мегаэлектронвольтах) $0,0039 \cdot 931 = 3,63$ Мэв. Экспериментально обнаружена величина, равная 3,57 Мэв. Таким образом, подсчет энергетического эффекта полностью совпадает с найденным на опыте.

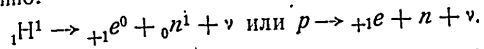
Чтобы выяснить физическую сущность β^+ -распада и ответить на вопрос о том, каким образом атомное ядро, не имея в своем составе позитронов, способно выделить позитрон, способно к β^+ -распаду, следует рассмотреть состав исходного и получающихся атомных ядер. Очевидно, в состав ядра ${}_{14}\text{Si}^{27}$ входит 14 протонов и $27 - 14 = 13$ нейтронов, а в состав ядра ${}_{13}\text{Al}^{27}$ входит 13 протонов и 14 нейтронов.

Для наглядности составим таблицу:

Обозначение ядра	Число протонов	Число нейтронов
${}_{14}\text{Si}^{27}$	14	13
${}_{13}\text{Al}^{27}$	13	14

Как видно, при превращении ядра атома кремния в ядро атома алюминия число протонов уменьшилось на единицу, а число нейтронов воз-

росло на единицу, осуществилось превращение протона в нейтрон. Поскольку β^+ -распад совершается с вылетом позитрона и нейтрино, то протон превращается в нейтрон, позитрон и нейтрино:



Таким образом, β^+ -распад атомного ядра по существу является превращением протона в нейтрон, позитрон и нейтрино, совершающимся в ядре под влиянием ядерных сил и сил электрического отталкивания. Любопытно отметить, что свободный протон не может самопроизвольно превратиться в нейтрон, так как это превращение должно сопровождаться поглощением энергии, ибо, как в этом легко убедиться, дефект массы отрицателен. Действительно, массы покоя атома водорода, позитрона (и электрона) и нейтрона соответственно равны 1,008131, 0,000548 и 1,00895, поэтому дефект массы равен $(1,008131 - 0,000548) - (0,000548 + 1,00895) = -0,001915$, чему соответствует отрицательный энергетический эффект $-1,8$ Мэв. Поэтому превращение протона в нейтрон, позитрон и нейтрино требует сообщения энергии в количестве 1,8 Мэв и самопроизвольно протон не может превратиться в другие частицы. Свободные протоны могут существовать сколь угодно долго, например, играя роль атомного ядра в атоме водорода.

Остается теперь рассмотреть вопрос о том, в чем лежит причина β^- -распада и β^+ -распада. Чтобы ответить на этот вопрос, обратим свое внимание на составы устойчивых атомных ядер, наиболее легких с порядковыми номерами до 20, со средним значением массового числа несколько выше 100 и с порядковыми номерами около 60 и,

наконец, тяжелых атомных ядер с массовым числом выше 200 и порядковым номером около 90 и выше. Для иллюстрации возьмем некоторые примеры, данные о которых представим в таблице.

Обозначение ядра	Число протонов в ядре	Число нейтронов в ядре	Отношение числа нейтронов к числу протонов
${}^2\text{He}^4$	2	2	1:1
${}^6\text{C}^{12}$	6	6	1:1
${}^{10}\text{Ne}^{20}$	10	10	1:1
${}^{59}\text{Pr}^{141}$	59	82	1,39:1
${}^{66}\text{Tb}^{169}$	65	94	1,45:1
${}^{90}\text{Th}^{232}$	90	142	1,58:1
${}^{92}\text{U}^{238}$	92	146	1,59:1

Рассматривая эту таблицу, прежде всего отметим, что ядра Th^{232} и U^{238} мы считаем устойчивыми, хотя они радиоактивны и испытывают альфа-распад. Однако периоды полураспада для них так велики, именно $1,389 \cdot 10^{10}$ лет и $4,498 \cdot 10^9$ лет, что эти ядра действительно можно считать устойчивыми.

Анализируя данные этой таблицы, мы приходим к определенному выводу, что в устойчивых ядрах по мере роста в них числа протонов число нейтронов растет быстрее. Если для устойчивости легких ядер числа протонов и нейтронов должны быть одинаковыми (или примерно одинаковыми) отношение этих чисел равно 1 (или около единицы), то для устойчивости ядер с массовым числом несколько большим 100 это отношение равно примерно 1,4, а для устойчивости тяжелых ядер отношение числа нейтронов к числу протонов должно быть около 1,6.

Таким образом, для устойчивости атомного ядра с данным числом протонов число нейтронов

может изменяться лишь в узких пределах. Избыток или недостаток обуславливает неустойчивость ядра.

Почему же для устойчивости ядра число нейтронов в нем должно расти быстрее числа протонов? Объяснение этому факту можно найти в том, что ядерные силы в ядре действуют лишь между соседними частицами из-за их близкого действия, в то время как силы электрического отталкивания из-за их дальнего действия простираются на всю область ядра. Поэтому по мере увеличения числа протонов в ядре усиливается электрическое отталкивание между протонами и для ослабления эффекта необходимо протоны дальше отодвинуть друг от друга путем внедрения между ними нейтронов. Таким образом, нейтроны как бы разбавляют собой протоны, отодвигают их друг от друга и тем самым ослабляют эффект электрического отталкивания, в то же время притягивая протоны к себе за счет ядерных сил.

Естественно поэтому, что при малом числе протонов электрические силы отталкивания компенсируются ядерными силами, исходящими от нейтронов, число которых равно или близко к числу протонов, в то время как при большом числе протонов эта компенсация может привести к устойчивости ядра лишь при числе нейтронов, превышающем число протонов.

Во всяком случае для каждого числа протонов в ядре для его устойчивости необходимо определенное число нейтронов. Что произойдет, если в том или ином ядре при данном числе протонов число нейтронов меньше того числа нейтронов, при котором ядро должно быть устойчивым? Должен осуществиться процесс уменьшения числа протонов и соответственно увеличиться число ней-

тронов, который и должен привести ядро к таким числам протонов и нейтронов, которые отвечают устойчивости ядра.

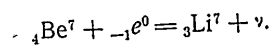
Следовательно, при относительно малом числе нейтронов в ядре должен осуществиться процесс его увеличения, β^+ -распад, поскольку последний уменьшает число протонов и увеличивает число нейтронов в ядре. Наоборот, если в атомном ядре число нейтронов превышает то, которое соответствует числу протонов в устойчивом ядре, то в ядре должен осуществиться β^- -распад, поскольку последний является следствием превращения одного нейтрона в протон и, очевидно, связан с уменьшением числа нейтронов и увеличением числа протонов. Из всего сказанного следует простое правило, что легкие изотопы для данного порядкового номера являются β^+ -активными в то время, как тяжелые β^- -активными. Это правило можно проиллюстрировать многочисленными примерами; один из этих примеров приведен ниже, в таблице:

Обозначение изотопа	Содержание в природном фосфоре	Число протонов в ядре	Число нейтронов в ядре	Характер активности
$^{16}\text{P}^{29}$	Нет	15	14	β^+
$^{16}\text{P}^{30}$	Нет	15	15	β^+
$^{16}\text{P}^{31}$	100%	15	16	Устойчив
$^{16}\text{P}^{32}$	Нет	15	17	β^-
$^{16}\text{P}^{34}$	Нет	15	19	β^-

Таким образом, для устойчивости атомного ядра, содержащего определенное число протонов, необходимо определенное число нейтронов. Отклонение числа нейтронов в ядре от того числа, которое соответствует устойчивости и обусловли-

вает ту или иную активность, имеет весьма существенное значение в проблеме практического использования ядерной энергии.

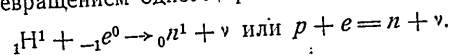
K-захват или E-захват. K-захват — самопроизвольное превращение атомного ядра, обусловленное захватом атомным ядром электрона из электронной оболочки атома, сопровождающееся выделением нейтрино. При этом из исходного атомного ядра образуется другое атомное ядро с тем же массовым числом, но с порядковым номером, меньшим на единицу. Примерами атомных ядер, испытывающих K-захват, являются ${}^4\text{Be}^7$ (бериллий 7), ${}^9\text{F}^{18}$ (фтор 18), ${}^{18}\text{Ar}^{37}$ (аргон 37), ${}^{19}\text{K}^{40}$ (калий 40) и др. Запись K-захвата для ядра ${}^4\text{Be}^7$ может быть сделана в виде



Ядро ${}^3\text{Li}^7$ является устойчивым. Сущность K-захвата может быть выяснена на основании рассмотрения составов исходного и получающихся атомных ядер.

Обозначение атомного ядра	Число протонов	Число нейтронов
${}^4\text{Be}^7$	4	3
${}^3\text{Li}^7$	3	4

При рассмотрении таблицы можно увидеть, что как и в случае β^+ -распада, K-захват связан с превращением одного протона в нейтрон:



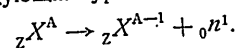
В результате K-захвата отношение числа нейтронов к числу протонов вместо 3:4 для ${}^4\text{Be}^7$

становится равным 4:3 для ${}^7_3\text{Li}$, что, очевидно, более соответствует устойчивости ядра. Поскольку K -захват является формой превращения протона в нейтрон, то, очевидно, только те изотопы способны к этому виду радиоактивных превращений, для которых число нейтронов меньше того числа, которое соответствует устойчивости ядра при данном числе протонов. Поскольку превращение протона в нейтрон сопряжено с увеличением массы, то оно может осуществляться лишь за счет энергии исходного ядра и не может протекать самопроизвольно, что и объясняет, почему атом водорода, состоящий из одного протона и электрона, может существовать сколь угодно долго.

Общие понятия, связанные с радиоактивностью, как период полураспада имеют полную силу и для K -захвата. Название K -захват возникло из того факта, что K -электронами называют один (как в случае атома водорода) или два (всех остальных атомов) электрона, находящиеся в электронной оболочке ближе всего к атомному ядру. Особенностью K -захвата является факт излучения рентгеновских лучей атомами, испытывающими этот вид радиоактивного распада; следует заметить, что испускаемые рентгеновские лучи являются характерными для получающихся при распаде атомов. Объясняется это тем, что после захвата K -электрона ядром на освободившееся место в электронной оболочке, которая уже соответствует новому ядру — другому элементу, переходит какой-либо электрон из той же оболочки. Известно, что такой переход электрона сопровождается излучением кванта (фотона) рентгеновских лучей.

n -распад. Как ниже будет указано, при делении тяжелых атомных ядер, которым соответ-

ствует большая величина отношения числа нейтронов к числу протонов, образуются «осколки», новые атомные ядра с большим избытком нейтронов по сравнению с тем, которое должно отвечать числам протонов в «осколочных» ядрах. Из-за этого избытка «осколочные» ядра выделяют нейтроны, которые называются запаздывающими. Схема такого n -распада может быть представлена следующим уравнением:

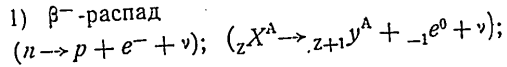


Период полураспада нейтронно-активных атомных ядер невелик, он не превышает нескольких десятков секунд. Нейтронно-активные атомные ядра образуются или при взрыве атомной бомбы, или в атомном реакторе, в котором, как это будет рассказано ниже, осуществляется цепная реакция деления атомных ядер тяжелых изотопов. Нейтронно-активные атомные ядра играют особую роль при регулировке работы атомных реакторов.

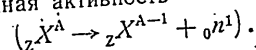
Отметив выше особую роль, которую играет состав атомного ядра на характер его радиоактивного превращения, можно теперь дать краткое обобщение.

Атомное ядро, содержащее избыток нейтронов, по сравнению с тем, которое обеспечивает устойчивость при данном числе в нем протонов, способно уменьшить этот избыток следующими радиоактивными превращениями:

1) β^- -распад



2) нейтронная активность



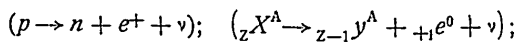
Вообще говоря, можно было бы себе представить и третью возможность:

3) β^+ -захват.

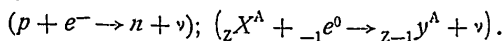
Однако этот вид теоретически возможного превращения не обнаружен экспериментально. Осуществление этого превращения едва ли может реализоваться из-за того, что атомное ядро несет, вообще говоря, большой положительный заряд, и чтобы позитрон мог достигнуть ядра, он должен иметь очень большую энергию. Получение позитронов со столь большой энергией не может считаться простой задачей.

Атомное ядро, содержащее избыток протонов по сравнению с тем, которое соответствует устойчивости ядра при данном числе нейтронов, способно уменьшить этот избыток путем следующих радиоактивных превращений:

1) β^+ -распад

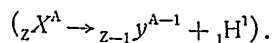


2) K -захват



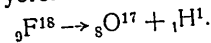
Вообще говоря, можно представить себе и третью возможность для ядра уменьшить избыток протонов, именно, путем протонной активности, испуская протон;

3) p -распад



Однако этот вид активности наблюдался в небольшом числе случаев, именно для так называемых «составных» ядер, т. е. тех, которые образуются при бомбардировке атомных ядер какими-либо частицами. Например, при бомбардировке

ядер азота альфа-частицами Резерфорд наблюдал образование протонов. Это наблюдение можно объяснить тем, что при ударе альфа-частицы о ядро атома азота образуется составное ядро атома фтора (изотопа фтор 18) ${}_7 N^{14} + {}_2 He^4 = {}_9 F^{18}$. Природный фтор, как известно, состоит только из одного изотопа ${}_9 F^{19}$, в атомном ядре которого содержится 9 протонов ($Z=9$) и 10 нейтронов ($N=10$). В составном же ядре на 9 протонов приходится только 9 нейтронов, и, следовательно, этому изотопу ${}_9 F^{18}$ соответствует избыток протонов (или недостаток нейтронов). Поэтому, как это экспериментально установлено, составное ядро ${}_9 F^{18}$ протонно-активно и испускает протон, образуя устойчивое ядро изотопа кислорода



Деление атомных ядер. Деление атомных ядер — явление, открытое в 1940 г. советскими исследователями К. А. Петржаком и Г. Н. Флеровым, состоит в самопроизвольном, спонтанном, невынужденном делении тяжелых атомных ядер на две, вообще говоря, неравные части. Это явление было обнаружено вначале для атомных ядер урана, но затем оказалось, что оно имеет место для многих тяжелых ядер. На рис. 23 представлен атом урана ${}_{92} U^{238}$ с ядром и электронной оболочкой; ради простоты последняя изображена не с 92, а с 9 электронами. На рис. 24 представлена промежуточная стадия деления атома урана; на рис. 25 представлены атом урана и атом криптона, получившиеся при делении атома урана 238. Теоретические подсчеты показали, что деление возможно не только для урана 238, но и для всех ядер с массовым числом, превышающим 100. Прежде всего надо отметить,

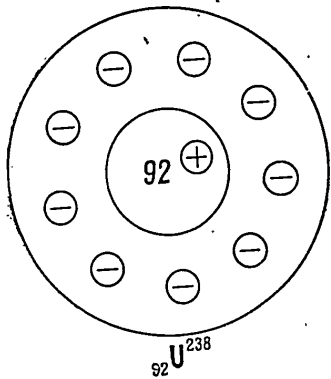


Рис. 23. Схема строения атома урана 238

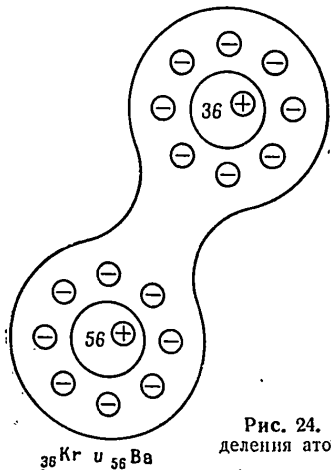


Рис. 24. Схема деления атома урана

что самопроизвольное деление возможно только в том случае, если оно сопровождается выделением энергии. Это становится очевидным, если иметь в виду закон сохранения энергии. В силу этого закона, если деление должно сопровождаться поглощением энергии, то для осуществления деления ядру надо сообщить энергию, но тогда не может быть речи о самопроизвольности деления. Теоретические расчеты показывают, что с ростом порядкового номера количество выделяемой при делении энергии увеличивается и, следовательно, только ядра с большим порядковым номером могут разделиться и для них энергия будет выделяться при их делении. В приведенной ниже таблице знак минус означает поглощение энергии:

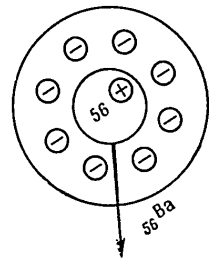
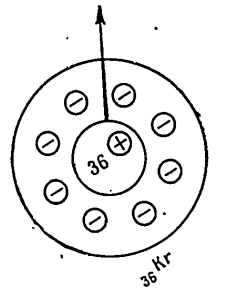


Рис. 25. Атомы бария и криптона, образовавшиеся при делении атома урана

Исходное ядро	Продукты деления	Количество выделенной энергии в Мэв
$^{23}_{11}\text{Ni}61$	$^{14}_{14}\text{Si}30$, $^{14}_{14}\text{Si}31$	-11
$^{50}_{50}\text{Sn}117$	$^{26}_{26}\text{Mn}69$, $^{26}_{26}\text{Mn}69$	+10
$^{68}_{68}\text{Er}167$	$^{34}_{34}\text{Se}83$, $^{34}_{34}\text{Se}84$	+94
$^{82}_{82}\text{Pb}206$	$^{41}_{41}\text{Nb}103$, $^{41}_{41}\text{Nb}103$	+120
$^{92}_{92}\text{U}238$	$^{46}_{46}\text{Pd}118$, $^{46}_{46}\text{Pd}120$	+200

Среди приведенных примеров самопроизвольное деление невозможно лишь для изотопа никеля Ni^{101} , а для остальных изотопов такое деление возможно.

В чем же проявляется деление атомного ядра? Пусть в некоторый момент атомное ядро урана 238 (${}_{92}U^{238}$) под влиянием причин, заложенных в нем самом, в результате действия сил притяжения и отталкивания разделилось на две равные части, в каждой из которых содержится 46 протонов и 73 нейтрона. Ядерные силы в следующее после деления мгновение при нахождении получившихся двух «осколков» на расстоянии диаметра ядра резко уменьшатся в то время, как силы электрического отталкивания из-за их дальнего действия будут проявлять себя. «Осколки», отталкиваясь друг от друга, начнут двигаться во взаимно противоположных направлениях со все возрастающей скоростью. Отдаляясь друг от друга, каждый из «осколков» захватит часть электронной оболочки материнского атома и, таким образом, возникнут два новых атома с завершенными или незавершенными электронными оболочками.

Отталкивание обоих «осколков» друг от друга приведет к тому, что они в конце концов будут иметь скорости около 10 000 км/сек, то есть приобретут большую кинетическую энергию. Следовательно, отталкивание «осколков» друг от друга осуществляет превращение энергии ядра в кинетическую энергию, энергию движения. Про это превращение говорят как о выделении энергии при делении ядра.

Теоретический расчет, сделанный на основе учета отталкивательных электростатических сил, показывает, что в случае деления ядра атома

урана 238 выделяется 165 Мэв. Этот расчет весьма приближенный, но вместе с тем подтверждается расчетами, сделанными иначе. Так, например, энергия связи, приходящаяся на один нуклон в ядре, для урана 238 равна 7,8 Мэв, а для «осколка» при порядковом номере 46 равна 8,6 Мэв. Поэтому разность этих энергий связи, приходящихся на один нуклон, равна 0,8 Мэв, и «осколки» имеют энергии меньше, чем исходное ядро на $0,8 \cdot 238 = 190$ Мэв.

Второй расчет привел к несколько большему значению количества выделяемой энергии, чем указанный выше расчет, основывающийся на учете электрических сил отталкивания. Объясняют это различие тем, что образующиеся «осколки», как об этом будет сказано ниже, сами являются радиоактивными и выделяют энергию в форме радиоактивных излучений. В качестве примера самопроизвольного деления ядра рассмотрим опытные данные одного случая деления ядра атома изотопа урана 236^1 , собранные в форме таблицы:

	Легкий «осколок»	Тяжелый «осколок»
Массовое число (A)	95	139
Порядковое число (Z)	38 (Sr)	54 (Xe)
Скорость (см/сек)	$1,4 \cdot 10^9$	$0,93 \cdot 10^9$
Энергия (Мэв)	97	65
Электрический заряд атома (e)	20	22
Средний пробег в воздухе (мм)	25	19

¹ Изотоп — уран 236 не встречается в природе и образуется при захвате нейтрона ядром изотопа уран 235.

Рассмотрение данных этой таблицы приводит к тому, что при делении ядра урана 236 помимо двух «осколков» выделились два нейтрона, поскольку сумма массовых чисел «осколков» $95 + 139 = 234$ на две единицы меньше массового числа исходного ядра, в то время как сумма порядковых чисел $38 + 54 = 92$ равна порядковому числу исходного атома. Судя по порядковым числам оба «осколка» являются атомами стронция (Sr) и ксенона (Xe), несущими свободные электрические заряды; первый из них имеет заряд $20e$, то есть его заряд по абсолютной величине равен заряду 20 электронов, а атом ксенона — 22 электронов. Эти заряды означают, что у образовавшегося атома стронция в его электронной оболочке не хватает 20 электронов, в то время как у атома ксенона — 22 электронов. Следовательно, оба «осколка» ядра атома урана 236 после деления разлетелись в разные стороны, не успев сформировать полностью свои электронные оболочки.

Обратим теперь внимание на тот факт, что возникшее в качестве «осколков» ядро атома стронция имеет в своем составе 38 протонов и $95 - 38 = 57$ нейтронов, в то время как в ядре получившегося атома ксенона содержится 54 протона и $139 - 54 = 85$ нейтронов. Отношение числа нейтронов к числу протонов для получившихся атомных ядер соответственно равно $57 : 38 = 1,50$; $85 : 54 = 1,57$.

Выше уже говорилось, что для каждого числа протонов в устойчивом атомном ядре должно быть определенное число нейтронов. Согласно табличным данным, порядковому номеру 38 соответствует отношение числа нейтронов к числу протонов для устойчивого ядра, равное 1,2—1,3,

а для устойчивого ядра с порядковым номером 54 это отношение равно 1,3 (Xe^{124}) — 1,48 (Xe^{134}). Таким образом, мы можем заключить, что оба образовавшихся при делении атомных ядра имеют в своем составе избыточные количества нейтронов и, как говорилось выше, оба они должны быть неустойчивыми, именно, должны испытать β^- -распад или быть нейтронно-активными.

Приведенный пример деления ядра урана 236 на ядро атома стронция и ядро атома ксенона является одним из случаев деления.

Другой пример деления атома урана 238 изображен на рис. 24 и 25. Ядро атома урана 238, испытав деление, образует два «осколка»: ядро атома бария (^{56}Ba) — тяжелый «осколок» и ядро атома криптона (^{36}Kr) — легкий «осколок». Оба ядерных «осколка», отталкиваясь друг от друга и сформировав около себя электронные оболочки, переходят в конце концов в два атома — атом бария и атом криптона.

Экспериментальные исследования показали, что различные ядра урана 236 могут по-разному делиться, то есть образовывать различные пары «осколков», отвечающие атомам с порядковыми номерами примерно от № 30 (цинк Zn) до № 62 (самарий Sm).

Для деления урана 238 период полураспада равен $8 \cdot 10^{15}$ лет. В одном грамме урана 238 в течение одного часа в среднем 24,8 атома испытывают деление в то время, как для урана 236 период полураспада деления равен $2 \cdot 10^{16}$ лет, и период полураспада его в один час делится в среднем в одном грамме его в один час делится в среднем 10 атомов. Если же, однако, предположить (в дальнейшем будет обосновано такое предположение), что за короткий отрезок времени много атомных ядер урана 236 разделятся, то на их

месте возникнет столько же пар «осколков» — в конечном счете атомов элементов с порядковыми номерами, лежащими в пределах от № 30 и до № 62.

Таким образом, если за очень короткий отрезок времени разделится много атомов урана 236, а при делении каждого образуются отлетающие с огромной скоростью друг от друга два атома, то в месте деления урана 236 возникнет атомный газ, состоящий из атомов 32 элементов. Здесь будут атомы цезия, бария, стронция, родия, рутения, прометия, празеодима, сурьмы, теллура, иода, ксенона и т. д. Невольно возникает вопрос о количестве того или иного изотопа, образующегося при делении атомов урана 236. Экспериментальные исследования привели к определенным данным, графически изображенным на рис. 26 в виде кривой. По оси абсцисс — по горизонтали отложены массовые числа, а по оси ординат — по вертикали логарифмы процентных содержаний атомов изотопов. На рис. 26 изображена кривая с двумя максимумами, отвечающими наибольшему содержанию «осколков» с массовыми числами около 95 и 139. Эта кривая, называемая часто М-кривой, может быть расчленена на две, одна из которых — левая половина — отвечает легким «осколкам» с массовыми числами от 80 до 110, а правая — тяжелым «осколкам» с массовыми числами 125—155. Поскольку при каждом делении образуется тяжелый и легкий «осколок», то каждой точке левой части кривой соответствует точка правой части кривой. При рассмотрении кривой становится очевидным, что деление ядер пополам, чему отвечает низшая часть кривой, между двумя наивысшими значениями, является сравнительно редким. Этой ча-

138

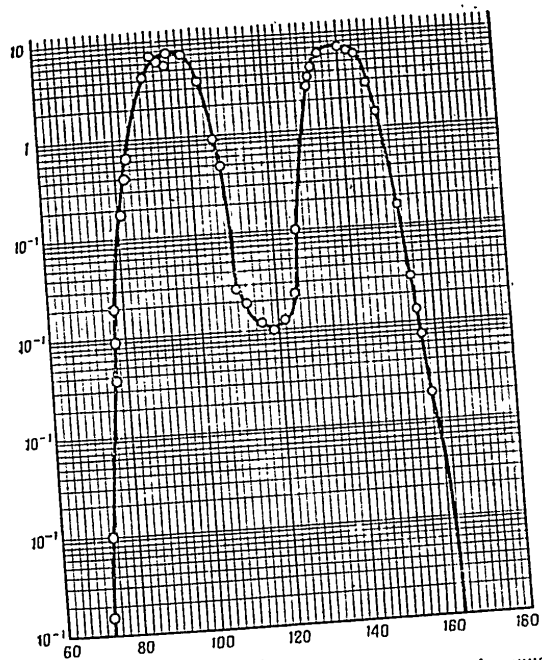


Рис. 26. Кривая распределения продуктов деления атомов урана 236

139

сти кривой отвечают «осколки» с массовыми числами, лежащими в интервале 110—125, количество которых среди всей массы «осколков» не превышает 1%. Наиболее вероятный случай деления, составляющий 6,4% всех делений, дают «осколки» с массовыми числами 95 и 139.

Детальное исследование показало, что «осколки», получившиеся при делении атомных ядер пополам и имеющие массу, равную 117 или 118, возникли от деления всего 0,01% от всех делящихся ядер. Если также иметь в виду возможность выделения двух или трех нейтронов в момент деления ядра, то все же образующиеся «осколки», атомные ядра других элементов, будут иметь такой состав из протонов и нейтронов, которому отвечает отношение чисел этих частиц примерно такое же, как у исходного ядра. Поскольку порядковые номера «осколков» намного меньше, чем для урана, а отношение числа нейтронов к числу протонов для устойчивых ядер непрерывно растет с ростом порядкового номера, то получается, что для «осколков» это отношение намного больше тех, которые отвечают устойчивым ядрам. Поэтому становится ясным, почему «осколки» в течение нескольких секунд после их образования (после деления ядра урана) выделяют нейтроны, называемые запаздывающими. Очевидно, эти «осколки» — атомные ядра — испытывают нейтронный распад. Несмотря на выделение запаздывающих нейтронов, все же «осколки» имеют избыточное количество нейтронов, поэтому они испытывают цепь β^- -распадов, в результате чего в их ядрах уменьшается число нейтронов, число протонов возрастает, а отношение этих чисел приближается к тому, которое отвечает устойчивости атомного ядра. Ниже, в

таблице, приведены некоторые примеры таких цепей β^- -распадов, причем в левом столбце указаны массовые числа образовавшихся «осколков», а наверху — порядковые номера и обозначения соответствующих химических элементов. В таблице указаны периоды полураспада соответствующих радиоактивных изотопов.

53 (I)	54 (Xe)	55 (Cs)	56 (Ba)	57 (La)	58 (Ce)
137	30 сек. → 3—4 мин. → 33 года → устойчив.				
138	17 мин. → 32 мин. → устойчив.				
139	41 сек. → 7 мин. → 85 мин. → устойчив.				
140	16 сек. → 40 сек. → 12,8 дня → 40 час. → устойчив.				
142	1 мин. → 6 мин. → 24 мин. → устойчив.				

Приведенные данные о некоторых цепях распадов показывают, что в конце концов из «осколков» с массовыми числами 137, 138, 139, 140, 142 образуются изотопы бария (Ba), лантана (La) и церия (Ce). Если за очень короткий промежуток времени много атомных ядер урана 236 испытает деление, то возникнет газовое облако, состоящее из атомов многих элементов, причем атомы β^- -радиоактивны и к тому же низируются. Надо иметь в виду, что во многих случаях бета-распад «осколков» сопровождается образованием гамма-лучей. Если произвести баланс массы для процесса деления одного килограмма урана 236, то получают следующие данные:

«осколки»	989 г
выделившиеся нейтроны	10 г
кинетическая энергия	0,8 г
гамма-излучение	0,1 г
	999,9 г

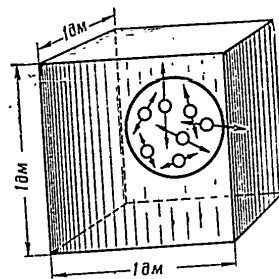
Параллельно с этим приведем данные баланса энергии, выделившейся при делении урана 236.

Форма энергии	Среднее значение в Мэв
Кинетическая энергия „осколков“	162
Кинетическая энергия нейтронов	6
Энергия гамма-лучей при делении	5
Энергия β -частиц	5
Энергия, уносимая нейтрино	11
Энергия мгновенного гамма-излучения	16
	195 Мэв

Приведенные выше данные баланса массы показывают, что при делении одного килограмма урана 236 дефект массы 0,1 г, то есть выделяется энергии примерно 0,1% от общего запаса в нем энергии. Именно, основываясь на этих данных, выше и была поставлена задача изыскания пути практического использования атомной энергии, хотя бы для начала на 0,1%.

Теперь обратим свое внимание на те практические последствия, к которым может привести деление атомных ядер. Допустим, в нашем распоряжении есть один килограмм урана, который помещим в кубический дециметр, как это изображено на рис. 27. Если иметь в виду плотность урана, равную 18,7, то один килограмм его будет занимать объем 53,5 см³, примерно $\frac{1}{20}$ часть кубического дециметра. Пусть одновременно разделятся все атомные ядра урана; тогда ядерные «осколки», отлетая друг от друга и сформировав полностью или частично электронные оболочки, превратятся в атомы различных элементов — ба-

рия, цезия, лантана, церия, ксенона, мода и т. д. и кубический дециметр наполнится атомным газом. Используя приведенные данные о количестве выделившейся энергии, с помощью элементарных



1 кг урана { 989г продуктов деления
10г нейтронов
0,8г кинетической энергии
0,1г энергии фотонов
999,9г

Рис. 27. Схема возникновения атомного газа в кубическом дециметре при делении атомов в одном килограмме урана и баланс массы после деления

подсчетов можно оценить температуру и давление возникшего атомного газа. Температура окажется равной сотням миллионов градусов, а давление будет равно миллиардам атмосфер.

Таким образом, продукты деления атомных ядер одного килограмма урана в момент одновременного деления всех ядер, заключенные в один

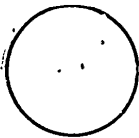


Рис. 28. Схема ядра как капли ядерной жидкости

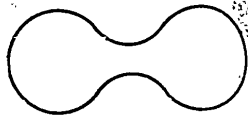


Рис. 29. Схема начальной стадии деления ядра атома

кубический дециметр, будут иметь огромную температуру (температура внутри Солнца около 19 млн. ($19 \cdot 10^6$ градусов) и огромное давление, с которыми мы в нашей обычной жизни, конечно, никогда не имеем дела. Все сказанное позволяет утверждать, что одновременное деление атомных ядер, даже в небольшом количестве урана, обусловит появление колоссального давления и температуры. Поэтому, если иметь возможность заставить разделиться атомные ядра за очень короткий отрезок времени, например, порядка 10^{-6} сек., то даже небольшой кусок урана может вызвать взрыв огромной силы. Атомная бомба как раз и является таким прибором, в котором за очень короткий промежуток времени (порядка 10^{-6} сек.) делятся ядра куска урана 235 (ура-

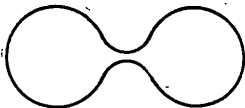


Рис. 30. Последняя стадия деления ядра атома

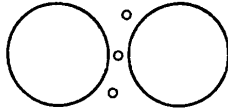


Рис. 31. „Осколки“ атомного ядра и свободные нейтроны, возникшие при делении атомного ядра

на 233 или плутония 239), вызывая тем самым взрыв огромной силы. Таким образом, деление атомных ядер открывает путь практического использования ядерной энергии. Вопрос теперь стоит так, каким же образом заставить делиться атомные ядра тяжелых изотопов, либо за короткий отрезок времени, вызывая взрыв, либо за длительный отрезок времени, обуславливая равномерное выделение энергии, с целью использования ее для решения народнохозяйственных задач. Наряду с таким вопросом возникает и другой — именно о физической сущности явления деления атомного ядра.

Воззрение на атомное ядро, как на каплю ядерной жидкости, позволило советскому ученому Я. И. Френкелю, а за границей ученым Бору и Уиллеру в 1939 г. разработать теоретические представления о сущности подобного деления. В атомном ядре под влиянием ядерных сил и сил кулоновского отталкивания между протонами в некоторое мгновение могут возникнуть упругие колебания, подобные тем, которые наблюдаются в капле обычной жидкости. В результате этих колебаний ядро приобретает удлиненную форму, и из шарообразного (рис. 28) оно станет эллипсоидным. Протоны, находящиеся на противоположных концах длинной оси образовавшегося эллипсоида, будут отталкиваться друг от друга, в то время как ядерные силы между частицами обеих половин эллипсоида сделаются очень малы из-за увеличившегося расстояния, и поэтому обе половины эллипсоида начнут отталкиваться друг от друга. Ядро примет еще более удлиненную форму, возникнет перетяжка, как это изображено на рис. 29; перетяжка начнет сужаться (рис. 30), и в конце концов возникнут две части —

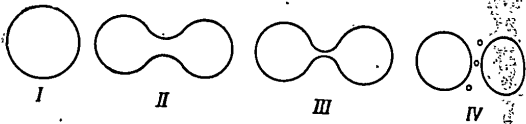


Рис. 32. Объединенная схема последовательных стадий деления атомного ядра

«осколки» исходного ядра (рис. 31). Маленькими кружочками обозначены нейтроны, освобожденные при подобном делении; они являются как бы брызгами ядерной жидкости, возникшими при делении атомного ядра. Все отдельные стадии процесса деления изображены совместно на рис. 32.

14. ЦЕПНАЯ РЕАКЦИЯ ДЕЛЕНИЯ КАК ПУТЬ ПРАКТИЧЕСКОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГИИ

Путь практического использования ядерной энергии на основе деления атомов урана наметился после открытия расщепления ядер урана нейтронами. Было обнаружено, что нейтрон, попадая в атомное ядро урана, захватывается им, и ядро урана тут же испытывает деление на два «осколка» и два или три нейтрона; «осколки» в момент образования испускают гамма-фотоны, как это изображено на рис. 33.

Вопрос об атомном взрыве, казалось, был решен тем фактом, что при делении образуются, вероятно, в среднем около трех нейтронов. Действительно, предположим, в нашем распоряжении имеется кусок урана; состоит он из атомов, расположенных в строго определенном порядке. Пусть в этом куске окажется нейтрон. Этот ней-

трон может возникнуть в самом куске в результате самопроизвольного деления атомных ядер урана или под действием космических лучей. Эти последние, возникая где-то в глубинах мирового пространства, состоят из материальных частиц, несущих с собой огромные количества энергии и пронизывающих нашу атмосферу. На своем пути космические частицы, встречая атомные ядра, вызывают их полное разрушение, в результате чего возникают свободные протоны и нейтроны. Наблюдения показали, что в 1 сек. в каждом миллилитре вещества разрушается 10 атомных ядер под действием космических лучей.

Таким образом, всегда и всюду есть нейтроны и, попадая в кусок урана, какой-нибудь из них

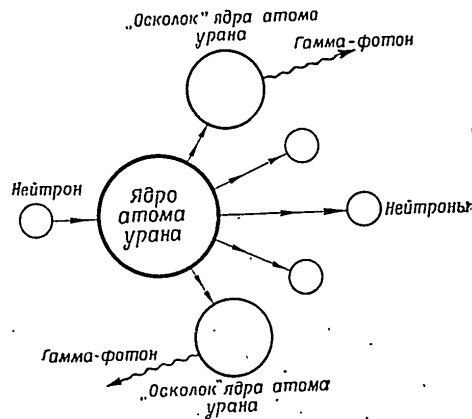


Рис. 33. Схема расщепления атомного ядра нейтроном

вызовет расщепление ядра атома урана (рис. 34); выделившиеся при расщеплении три нейтрона расщепят три ядра, образующиеся при этом девять нейтронов расщепят девять ядер атомов урана и т. д. Такой процесс последовательного

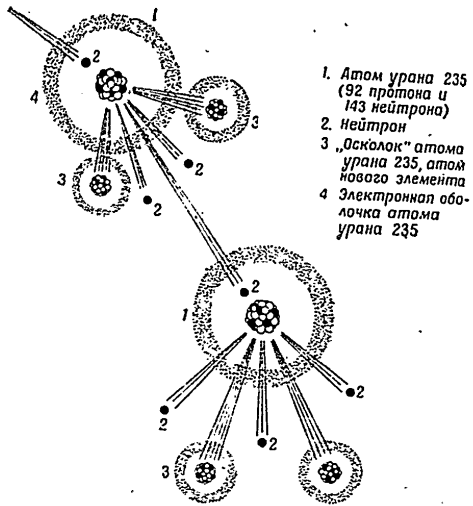


Рис. 34. Схема расщепления атома урана 235

деления атомных ядер называют цепной реакцией деления; схема такого деления для урана 235 дана на рис. 35. При развитии цепи, какой она описана здесь, на 10-й ступени будет образовываться 3^{10} нейтронов, и, таким образом, развитие цепи происходит с резким увеличением числа.

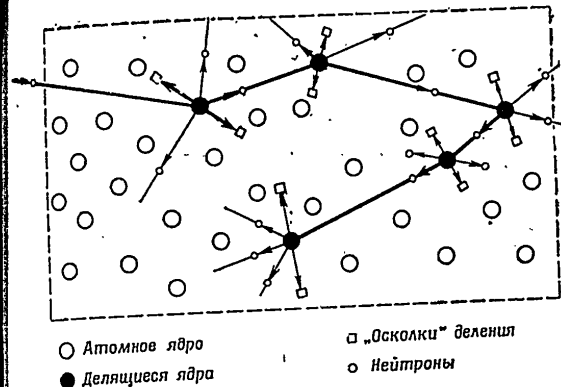


Рис. 35. Схема цепной реакции расщепления атомных ядер урана 235

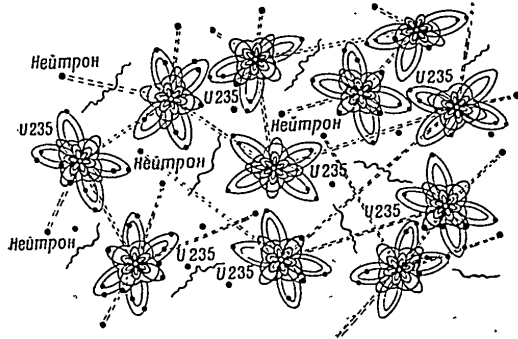


Рис. 36. Схема цепной реакции расщепления атомных ядер урана 235

нейтронов и со все возрастающей скоростью, (все с большим и большим числом атомных ядер, расщепляющихся в единицу времени). Другая схема развития цепной реакции дана на рис. 36, где атомные ядра урана изображены в беспорядочном расположении. Подобный процесс увеличения числа нейтронов можно изобразить схемой на рис. 37, на которой изображены отдельными шариками нейтроны. Здесь мы видим наглядную картину возрастания числа нейтронов в цепной реакции деления, которое можем назвать лавинообразным, подобно тому, как снежный ком,

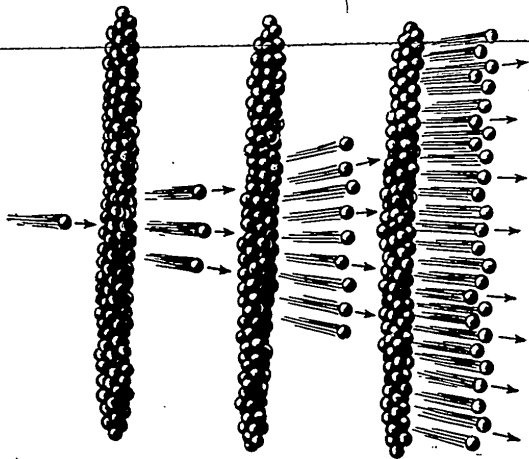


Рис. 37. Схема возрастания числа свободных нейтронов в результате течения цепной реакции расщепления атомных ядер



Рис. 38. Возрастание числа свободных нейтронов в куске урана по мере течения цепной реакции расщепления атомных ядер можно сравнить с возрастанием снежного кома, падающего по наклонной плоскости по снегу

катясь с горы, все возрастает в своем объеме (рис. 38).

Таким образом, вслед за открытием расщепления атомного ядра урана с образованием нескольких нейтронов (вероятно, в среднем около 3) возникло представление об атомном взрыве, поскольку развитие цепной реакции должно совершаться из-за лавинообразного и саморазвивающегося ее течения с большой скоростью, а каждый акт деления сопровождается образованием двух атомов, движущихся с огромными скоростями.

Каков же механизм расщепления атомного ядра? Выше уже указывалось, что присоединение нейтрона к атомному ядру, называемое захватом

ядром нейтрона, должно сопровождаться освобождением энергии связи, и следовательно, в первый момент захвата нейтрона ядро обладает избыточным количеством энергии, и поэтому такое его состояние называют возбужденным. Обычно этот избыток энергии ядро выделяет в форме гамма-фотона.

Однако надо иметь в виду, что в атомном ядре как круглой капле ядерной жидкости (об этом говорилось выше) в первый же момент вслед за захватом нейтрона избыточная энергия может проявить себя, вызвав упругие колебания. Теория таких колебаний в жидкой капле была давно разработана. Оказывается, если избыточной энергии достаточно много при данном составе ядра, то эти упругие колебания вызовут удлинение капли в одном из направлений. Затем около середины капли возникает сужение, капля принимает вид гантели и, наконец, разделится на две, и при этом в виде брызг образуются свободные нейтроны.

Разделению капли на две способствуют электрические силы отталкивания. Стадии различных состояний капель изображены на рис. 32. В том же случае, если при данном составе ядра избыток энергии, возникший при захвате нейтрона, окажется недостаточным, чтобы вызвать упругие колебания, приводящие к делению ядра, то он будет излучен ядром с гамма-фотоном.

Конечно, избыток энергии будет больше, если поглощенный ядром нейтрон имел большую кинетическую энергию. Поэтому вполне возможен случай, когда поглощение медленного нейтрона не вызывает деления ядра, а деление становится возможным при поглощении ядром быстрого нейтрона. В связи со всем сказанным возникло пред-

152

ставление об энергии активации деления ядра атома, как того количества энергии, которое необходимо сообщить ядру, чтобы оно испытало деление. Экспериментальные исследования и теоретические расчеты привели к установлению величины энергии активации для различных изотопов. Некоторые данные об энергии активации приведены в таблице:

Изотоп	Энергия активации в Мэв	Изотоп	Энергия активации в Мэв
$^{112-124}_{80}\text{Sn}$	40—50	$^{234}_{92}\text{U}$	4,8
$^{196-204}_{80}\text{Hg}$	11—15	$^{235}_{92}\text{U}$	5,0
$^{226}_{88}\text{Ra}$	7,6	$^{238}_{92}\text{U}$	5,3
$^{231}_{90}\text{Th}$	6,5	$^{239}_{92}\text{U}$	5,9
$^{233}_{90}\text{Th}$	6,9		
$^{232}_{91}\text{Pa}$	5,5		

Итак, чтобы ядро данного состава могло разделиться, оно должно обладать избыточным количеством энергии большим, чем энергия активации. Необходимо здесь отметить, что как весьма маловероятное событие возможно самопроизвольное деление тяжелых атомных ядер, например, для ядер атомов урана, тория и др. Однако такое спонтанное деление совершается редко. Как говорилось выше, из $2,54 \cdot 10^{21}$ атомных ядер урана 238 в один час самопроизвольно делится всего 24,8 атомных ядра. Рассматривая последнюю таблицу, легко видеть, что для изотопов олова (Sn) и ртути (Hg) энергия активации счень велика; она уменьшается с ростом порядкового номера. Так как поглощение медленного нейтрона атомом олова должно сопровождаться выделением примерно 8,5 Мэв, то это поглощение не может вызвать деления. Энергия активации

153

значительно превосходит энергию связи, приходящуюся на один нуклон в ядре. Обращаясь же к другим изотопам, можно сказать, что во всяком случае для некоторых из них поглощение медленного нейтрона может вызвать деление, поскольку может оказаться, что энергия связи, приходящаяся на один нуклон, будет больше энергии активации. Разность между энергией активации и энергией связи, приходящейся на один нуклон, носит название энергетического порога для данного изотопа. Смысл этой величины тот, что нейтрон, обладающий кинетической энергией, большей, чем величина энергетического порога, способен вызвать деление ядра. Для сравнения все эти величины приведены ниже в таблице.

Исходное ядро	Делящееся ядро	Энергия активации в Мэв	Энергия связи в Мэв	Энергетический порог в Мэв	Энергетический порог, найденный экспериментально, в Мэв
Th ²³¹	Th ²³²	6,5	5,3	1,2	—
Th ²³²	Th ²³³	6,9	5,2	1,7	1,1
Ra ²³¹	Ra ²³²	5,5	5,4	0,1	Близко к нулю
U ²³³	U ²³⁴	—	—	—	То же
U ²³⁴	U ²³⁵	5,0	5,4	-0,4	—
U ²³⁵	U ²³⁶	5,3	6,4	-1,1	0
U ²³⁸	U ²³⁹	6,0	5,2	0,8	—
Pu ²³⁹	Pu ²⁴⁰	—	—	—	0
Np ²³⁷	Np ²³⁸	—	—	—	0

Рассматривая данные этой таблицы, можно сделать вывод, что цепная реакция деления может развиваться только для изотопов Ra²³¹, U²³³, U²³⁴, U²³⁵, Pu²³⁹, Np²³⁷, поскольку после поглощения ими нейтронов образуются атомные ядра с отрицательным или же равным нулю энергетическим порогом. Из приведенных здесь изотопов

практическое значение могут найти лишь изотопы U²³³, U²³⁵, Pu²³⁹, так как они могут быть получены в достаточно больших количествах.

Поэтому, когда в печати идет речь о «делящихся материалах», «о взрывчатом ядерном горючем», то следует иметь в виду, что этими терминами называют вещества, состоящие либо из изотопа U²³⁵, либо из изотопа U²³³, либо из изотопа Pu²³⁹.

Почему же в изотопе U²³⁸ не может развиваться цепная реакция деления? Потому, что энергетический порог для этого изотопа равен довольно большой величине, согласно данным таблицы 0,8 Мэв. В момент деления атомного ядра, точнее сказать в интервале времени порядка 10⁻¹⁴ сек., выделяются нейтроны с различными скоростями и, значит, с различными энергиями в пределах от очень малых значений до 10 Мэв. Если графически изобразить зависимость числа нейтронов, возникших при делении очень большого числа атомных ядер, от их энергии, то есть если по оси абсцисс откладывать величины энергии нейтронов, а по оси ординат соответствующие им числа нейтронов, то получится кривая, изображенная на рис. 39, называемая спектром нейтронов деления.

Рассматривая эту кривую, можно сделать вывод, что некоторая доля нейтронов и довольно существенная (см. рис. 39), отвечающая части кривой, лежащей левее пунктирной вертикали, состоит из нейтронов, вообще не способных из-за малости энергии вызвать деление атомных ядер U²³⁸. Таким образом, деление атомных ядер урана могут вызвать лишь быстрые нейтроны. Однако в отношении быстрых нейтронов (нейтронов с большой энергией) надо иметь в виду, что они

могут из-за своего малого размера и малого размера атомных ядер выйти за пределы "куска" урана и что их способность вызывать деление атомных ядер уменьшается с увеличением скорости. Помимо того, надо учесть, что быстрые нейтроны, сталкиваясь с атомными ядрами урана, могут рассеиваться, не вызывая деления, и отдавать часть своей энергии атомным ядрам. Таким образом, некоторая часть быстрых нейтронов не



Рис. 39. Кривая распределения нейтронов деления по энергиям

вызовет деления атомных ядер урана 238, но постепенно, вследствие соударения с ними, потеряет часть своей кинетической энергии и вообще не будет в состоянии вызывать деление атомных ядер урана 238. Из-за этих особенностей в куске урана, состоящем из одного изотопа U^{238} , или в куске природного урана, в котором изотопа U^{238} содержится 99,3%, цепная реакция не развивается.

В ходе второй мировой войны в США был построен огромный завод с целью выделения изотопа урана 235 (U^{235}), содержащегося в количестве 0,7% в природном уране. Для разделения изотопов U^{238} и U^{235} , содержащихся в природном

уране, последний путем соответствующей химической обработки переводили в шестифтористый уран (UF_6), вещество, легко переходящее в газовое состояние. Газообразный шестифтористый уран состоит из молекул $U^{238}F_6$ и $U^{235}F_6$; веса этих молекул отличаются примерно на 0,9%. Более легкие, именно $U^{235}F_6$, обладают несколько большей скоростью теплового движения, ибо во всяком газе и, значит в газообразном шестифтористом уране все молекулы находятся в непрерывном движении и более легкие молекулы движутся с большей скоростью. Используя различие скоростей молекул $U^{238}F_6$ и $U^{235}F_6$, можно разделить эти молекулы на основе, например, явления диффузии.

Диффузией называют самопроизвольное распространение одного вещества в другом при непосредственном их контакте. Здесь нас интересует диффузия одного газа в другом. Если сравнить скорости распространения, то есть скорости диффузии двух каких-либо газов в каком-либо третьем, то легко обнаружить, что скорость диффузии у того газа больше, у которого меньше масса молекулы. Рассматривая шестифтористый уран как смесь двух газов, молекулы которых $U^{238}F_6$ и $U^{235}F_6$, то очевидно, приведя эту смесь в контакт, например, с азотом, можно будет обнаружить, что в азот скорее будут проникать молекулы $U^{235}F_6$, чем более тяжелые молекулы $U^{238}F_6$. Поэтому, отделив рассматриваемую газовую смесь, распределенную в азоте, от чистого азота пористой стенкой, можно будет заметить, что в чистом азоте появятся как молекулы $U^{238}F_6$, так и $U^{235}F_6$, но последних будет относительно

больше, чем в исходной смеси. Повторяя эту операцию многократно, можно разделить изотопы урана 238 от урана 235. Разработаны и другие способы разделения смеси изотопов.

Таким образом, изотопы урана U^{238} и U^{235} были разделены, т. е. могли быть изготовлены куски урана, состоящие только из изотопа U^{235} . Следует отметить, что из-за огромных трудностей разделения изотопов урана, потребовавших для их преодоления затраты огромных средств и труда, стоимость урана, состоящего только из одного изотопа урана 235, очень велика и значительно превосходит стоимость большинства других материалов.

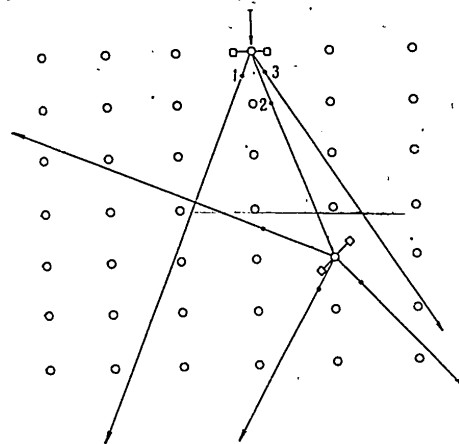
Возникает теперь вопрос, каким образом вызвать атомный взрыв у делящегося материала, например, урана 235?

15. КРИТИЧЕСКАЯ МАССА

Представим себе, что в нашем распоряжении есть кусок урана 235; возникает вопрос о возможности осуществления с ним атомного взрыва. Кусок урана 235 по своему строению и виду ничем не отличается от куска природного урана. В нем, как и во всяком куске металла, атомы, составляющие его, расположены в определенном порядке, как изображено на рис. 40. Если иметь в виду, что диаметр атомного ядра урана порядка 10^{-12} см и атомные ядра урана 235 расположены друг от друга на расстоянии, в сотню тысяч раз превышающем диаметр ядра, то ясно, что на рисунке масштаб не соблюден.

Предположим теперь, что мы имеем небольшой кусок урана 235 и в одно из атомных ядер попадает нейтрон, вызывающий расщепление

ядра; образующиеся «осколки» (на рис. 40 изображены маленькими квадратами) разлетятся в разные стороны и возникнут свободные три нейтрона; первый из них (под номером 1); из-за



- ядра атомов урана 235
- свободные нейтроны
- «осколки» ядер атомов урана 235

Рис. 40. Схема затухания ядерной реакции расщепления в куске урана с массой, меньшей критического значения

малости своего размера (размер нейтрона 10^{-13} см) и из-за малости размеров атомных ядер урана, пролетит мимо ядер, не столкнувшись с ними, и вылетит за пределы куска урана.

Другому нейтрону под номером 2 при движении в куске урана, допустим, удастся встретиться с ядром урана и вызвать его расщепление. Образующимся вновь трем нейтронам, из-за малости их размеров и размеров ядра урана (если иметь в виду, как было предположено, что кусок урана небольшой), не удастся столкнуться с ядрами урана, и они вылетят за пределы куска. Судьба нейтрона, отмеченного цифрой 3, такова же, как и нейтрона, помеченного цифрой 1. Таким образом, цепная реакция оборвется, и взрыва не последует. Следовательно, чтобы осуществился взрыв, необходимо развитие цепной реакции.

В каком же случае это возможно? Как неоднократно упоминалось выше, для осуществления деления ядра атома урана 235 необходимо, чтобы один нейтрон попал в это ядро. При делении ядра образуется, скажем, три нейтрона. Очевидно, для развития цепной реакции необходимо, чтобы из трех выделенных при делении ядра нейтронов, по крайней мере, один вызывал деление какого-либо атомного ядра урана 235, а два остальных могут быть либо захваченными примесями в уране, либо рассеяты из куска, не вызывая деления. Опыт и теория подсказывают, что развитие взрывной цепной реакции осуществимо, когда на развитие цепной реакции из трех нейтронов в среднем больше, чем 1,02 нейтрона вызывают деление. Здесь не следует смущаться дробностью числа 1,02, ибо это только означает, что из 300 нейтронов, образовавшихся при делении, 102 нейтрона вызывают деление.

Таким образом, развитие цепной реакции деления возможно лишь тогда, когда относительно небольшое число нейтронов покидает кусок урана 235, не вызвав деления атомных ядер. Ка-

ким же образом уменьшить относительное число нейтронов, покидающих кусок урана 235? Есть два пути. Первый состоит в том, чтобы снаружи кусок урана покрыть веществом, отражающим нейтроны. Но вещество, полностью отражающее нейтроны, нет, можно лишь небольшую часть нейтронов вернуть назад, в кусок урана, если последний окружить слоем графита (чистого свободного углерода) или окисью бериллия. И то и другое вещество обладают очень слабо выраженной способностью поглощать нейтроны. Из-за того, что лишь небольшая часть нейтронов, вылетевших из куска урана, вернется в него, отразившись от «отражателя», вопрос о развитии цепной реакции не разрешается применением отражателей.

Другой путь, приводящий к цели, состоит в увеличении размера куска урана 235. Какой-либо нейтрон при малых габаритах куска урана 235 вылетел бы из него, но в большом куске для него увеличится вероятность столкнуться с ядром атома урана 235 и вызвать деление.

Таким образом, очевидно, что развитию цепной реакции способствует увеличение размеров куска урана 235, так как увеличивается масса куска и тем самым увеличивается число атомных ядер и возрастает вероятность встречи нейтронов с ядрами атомов. Число нейтронов, покидающих кусок, очевидно, пропорционально его поверхности, а последняя при увеличении размеров куска увеличивается медленнее массы, а следовательно, вероятность развития цепной реакции растет с увеличением размеров куска.

На основании всего сказанного можно прийти к выводу, что в больших кусках урана 235 цепная реакция обязательно разовьется и вызовет

взрыв, в то время как в малых кусках она не может развиваться. Поэтому большие куски урана 235, в которых имеются условия для развития цепной реакции деления, не могут вообще существовать. Под действием космических лучей возникшие вне куска урана 235 свободные нейтроны могут в него попасть, или даже в самом куске под действием этих лучей может появиться свободный нейтрон, или последний может возникнуть при самопроизвольном делении атомных ядер и тотчас же разовьется цепная реакция деления, и осуществится взрыв.

Итак, если в малых кусках цепная реакция не развивается, а она обязательно развивается в больших кусках, то для данной формы куска можно установить такие его наименьшие размеры, что в куске цепная реакция еще может развиваться, а если немного уменьшить эти размеры, то реакция развиваться не будет. Таким образом, для данной формы куска можно установить такое наименьшее значение массы, при которой цепная реакция деления может развиваться. Это значение массы называется критическим, а сама масса — критической. Поэтому кусок урана 235 с массой меньше критической может существовать, а с массой больше критической не может — он обязательно взорвется, так как в нем разовьется цепная реакция деления. Конечно, величина критической массы зависит от формы куска, материала оболочки и конструкции атомной бомбы.

Очевидно, что для проволоки или тонких пластин из урана 235 критическая масса очень велика. Но для каждой формы куска она имеет свое значение, для куба — одно, для цилиндра сплошного — другое, для пустотелого цилиндра —

третье, для бруска с прямоугольным сечением — четвертое, для сплошного шара — пятое и т. д.

Каково же значение критической массы для куска урана 235, скажем, для шаровой формы? В литературных источниках приводятся различные значения критической массы для шара из урана 235 от нескольких килограммов до десятков килограммов. Действительное значение остается неизвестным, так как является секретом государственной важности, ибо оно, как увидим далее, весьма важно для создания атомной бомбы. Есть основания предполагать, что для шара из урана 235 критическая масса около одного килограмма. На основании всего сказанного можно представить себе следующим образом осуществление атомного взрыва с помощью урана 235. Пусть из этого изотопа сделаны два куска заряда, каждый с массой меньше критической, и каждый является частью шара, так что при сближении их образуется шар с массой больше критического значения. Поэтому оба куска заряда могут существовать раздельно друг от друга, но в момент их контакта непременно возникнет взрыв. Схематически это изображено на рис. 41, на котором нарисованы два куска урана 235 с массами, меньшими соответствующих критических значений; соединение этих двух кусков образует шар с массой больше критической, что и вызывает взрыв.

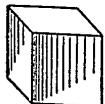
Можно и иначе представить себе осуществление взрыва с помощью урана 235. Допустим, из него сделаны два кубика, каждый с массой меньше критической (рис. 42). В момент их соединения образуется кусок в виде параллелепипеда с массой больше критической, и тогда возникнет взрыв (рис. 43). Таким образом, на основе раз-



Рис. 41. Иллюстрация атомного взрыва при соединении двух кусков расщепляющегося материала, каждый из которых имеет массу, чуть меньшую критической массы

вития цепной реакции деления атомных ядер урана 235 можно осуществить взрыв путем соединения двух кусков заряда, каждый с массой меньше критической, так чтобы при соединении их образовался кусок с массой больше критической. Соединение двух кусков в один с массой, большей критической и схема развития цепной реакции расщепления приведены на рис. 44. На основании всего сказанного можно утверждать, что развитие цепной реакции в делящемся материале, например, в уране 235 открывает путь практического использования ядерной реакции в форме взрыва.

U 235 или Pu 239



масса меньше критической

Рис. 42. Кусок урана 235 с массой, меньшей критической массы

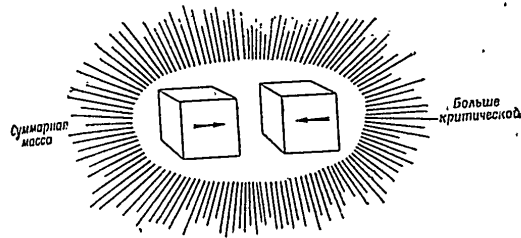
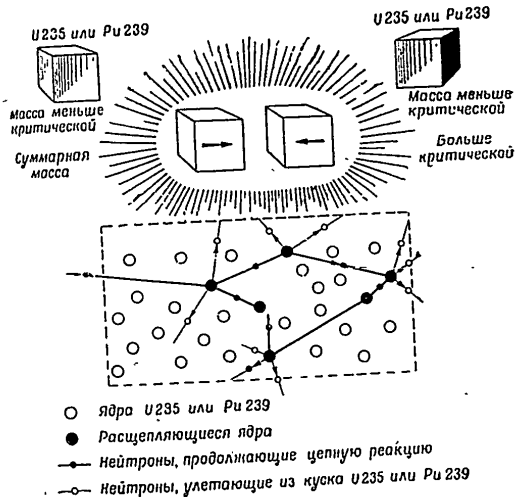


Рис. 43. Схема возникновения атомного взрыва при соединении двух кусков кубической формы урана с массами, меньшими критической величины



- ядра U 235 или Pu 239
- расщепляющиеся ядра
- нейтроны, продолжающие цепную реакцию
- нейтроны, улетающие из куска U 235 или Pu 239

Рис. 44. Объединенная схема возникновения атомного взрыва в цепной реакции расщепления

териалами, ядерным «горючим» и ядерным взрывчатым веществом. Одновременно отметим также и свойства тех изотопов, которые непосредственно связаны с выяснением условий течения цепной реакции деления. Наиболее интересные для нас свойства в виде численных характеристик соберем в отдельную таблицу, указав только на две величины: поперечное сечение деления и поперечное сечение радиационного захвата ядра по отношению к медленным нейтронам, не упоминавшиеся выше. Поперечное сечение деления характеризует собой сечение такой сферы, описанной вокруг атомного ядра, попав в которую, медленный нейтрон может вызвать деление ядра, а поперечное сечение радиационного захвата также характеризует сечение сферы, описанной вокруг ядра, попав внутрь которой, медленный нейтрон может быть захвачен ядром с последующим испусканием ядром гамма-фотона. Этот последний процесс обычно обозначают n, γ , а процесс расщепления ядра нейтроном n, Θ .

Если иметь в виду, что радиус атомного ядра, как это установлено экспериментально и обосновано теоретически, может быть описан формулой $R = 1,5 \cdot 10^{-13} \sqrt[3]{A}$ см, где A — массовое число атомного ядра, то есть число нуклонов в нем; площадь сечения атомного ядра будет равна $\pi R^2 = \pi (1,5 \cdot 10^{-13})^2 \sqrt[3]{A^2}$. Например, для атомного ядра урана 235 площадь сечения ядра равна $3,14 (1,5 \cdot 10^{-13})^2 \sqrt[3]{235^2} = 3,14 \cdot 2,25 \cdot 10^{-26} \cdot 38,1 = 2,78 \cdot 10^{-24}$ см², называют «барн», поэтому площадь сечения ядра атома урана 235 равна 2,78 барна. В том случае, если какое-либо атомное ядро особенно легко испытывает деление от медленного

нейтрона, поперечное сечение ядра по отношению к делению медленным нейтроном велико и значительно превосходит его поперечное сечение. Поэтому поперечное сечение атомного ядра по отношению к какому-либо процессу (деление, захват и др.) характеризует способность данного ядра по отношению к данному процессу, или, как говорят, оценивает вероятность осуществления данного процесса с ядром в потоке медленных нейтронов. Свойства некоторых тяжелых атомных ядер приведены в таблице.

Изотоп	Вид радиоактивности	Период полураспада		Поперечное сечение ядра по отношению к медленному нейтрону	
		радиоактивного превращения	самопроизвольного деления	деление (n, Θ)	радиационный захват (n, γ)
^{232}Th	α	$1,39 \cdot 10^{10}$ лет	$1,4 \cdot 10^{18}$ лет	$\leq 0,00002$	6,8
^{233}Th	β	23,3 мин.	—	—	1400 ± 200
^{233}Pa	β	27,4 дня	—	< 1	37 ± 14
^{233}U	α	$1,62 \cdot 10^6$ лет	$3 \cdot 10^{17}$ лет	~ 600	—
^{234}U	α	$2,48 \cdot 10^6$ лет	$2 \cdot 10^{16}$ лет	$\leq 0,005$	72 ± 10
^{235}U	α	$7,13 \cdot 10^8$ лет	$1,8 \cdot 10^{17}$ лет	545	100
^{236}U	α	$2,39 \cdot 10^7$ лет	$2 \cdot 10^{16}$ лет	—	—
^{238}U	α	$4,49 \cdot 10^9$ лет	$8 \cdot 10^{15}$ лет	$\leq 0,001$	2,8
^{239}U	β	23,54 мин.	—	—	22
^{239}Pu	β	2,33 дня	$5 \cdot 10^{12}$ лет	< 3	—
^{240}Pu	α	$24,36 \cdot 10^3$ лет	$5,5 \cdot 10^{15}$ лет	664	361
^{240}Pu	α	6600 лет	$1,2 \cdot 10^{11}$ лет	—	—

Рассматривая данные этой таблицы для изотопа урана 235 , легко увидеть, что он обладает не только ярко выраженной способностью к расщеплению медленными нейтронами (поперечное сечение $545 \cdot 10^{-24}$ см²), но и способностью к ра-

диационному захвату (поперечное сечение $100 \cdot 10^{-24}$ см²), и, следовательно, при пронизывании потоком медленных нейтронов куска из урана 235 некоторая часть из испытавших превращение атомных ядер, именно:

$$\frac{545 \cdot 10^{-24}}{545 \cdot 10^{-24} + 100 \cdot 10^{-24}} = \frac{545}{645} = 0,845 \text{ будет подвер-}$$

гаться делению, а $\frac{100 \cdot 10^{-24}}{545 \cdot 10^{-24} + 100 \cdot 10^{-24}} = \frac{100}{645} = 0,155$ подвергнется радиационному захвату, то есть из этой части возникнет сравнительно устойчивый изотоп уран 236, испускающий в момент своего образования гамма-фотон.

Таким образом, не все атомные ядра урана 235 при протекании цепной реакции деления испытывают расщепление, а наибольшее их число 84,5%; остальные же при столкновении с ними медленных нейтронов либо совсем не вступят в реакцию, либо из них образуется устойчивый изотоп уран 236. Следовательно, при расчете возможности осуществления ядерной реакции деления с данным изотопом необходимо учитывать и захват его ядрами нейтронов без последующего их расщепления. Примерно так же дело обстоит и с изотопами уран-233 и плутоний 239.

Аналогично тому, как способность к захвату ядром нейтрона или к его расщеплению медленным нейтроном характеризуют величиной поперечного сечения, соответственно захвата и расщепления, способность атомных ядер к рассеянию также оценивают величиной поперечного сечения ядра по отношению к рассеянию им нейтронов. Для важнейших изотопов эти величины поперечных сечений приведены на стр. 169 в таблице. Поперечные сечения атомного ядра в барнах (10^{-24} см²) показаны в той же таблице.

Поперечное сечение атомного ядра $\cdot 10^{24}$ см ²	U ²³⁵	U ²³⁸	Природный уран	Pu ²³⁹
Расщепление	545	0	3,92	664
Захват	100	2,8	3,5	361
Рассеивание	8,2	8,2	8,2	—

Приведенные в таблице данные весьма важны для расчетов цепных реакций деления тяжелых ядер.

16. ПРИНЦИПИАЛЬНАЯ СХЕМА УСТРОЙСТВА АТОМНОЙ БОМБЫ

Совершенно естественно, что подлинная схема устройства атомной бомбы и принцип ее действия являются секретом государственной важности, поэтому можно сделать лишь те или иные предположения по этому поводу, основываясь лишь на литературных данных и основных физических предпосылках. Здесь дается одна из возможных схем устройства атомной бомбы. Внутри оболочки атомной бомбы есть нечто вроде ствола, как это изображено на рис. 45; в качестве заряда имеется кусок урана 235 (или другого расщепляющегося материала) с массой M' , меньшей критической M_k . Будем представлять себе этот кусок заряда в виде сплошного цилиндра. Внутри же бомбы, может быть в конце ствола, имеется другой кусок заряда в виде пустотелого цилиндра с массой M'' меньше критической M_k , также из делящегося материала, например урана 235. Массы M' и M'' должны быть не только меньше соответствующих формам кусков заряда критических масс, но сумма их $M' + M''$ должна быть

больше критической. Если первый кусок заряда войдет во второй и образуется монолитный кусок, то этот кусок можно представить себе в виде сплошного цилиндра, для которого критическая масса M_k . Поэтому требование, чтобы сумма $M' + M''$ была больше критической, можно записать в виде неравенства $M' + M'' > M_k$.

Итак, когда атомная бомба заряжена, то по обоим концам ствола внутри бомбы есть заряды из делящегося материала. Чтобы заряды могли соединиться и образовать сплошной кусок из делящегося материала, используется обычное взрывчатое вещество. В определенный момент срабатывает взрыватель, пороховые газы выталкивают один ядерный заряд, и заряд, двигаясь по стволу, приобретает большую скорость, вгоняется в другой заряд в виде пустотелого цилиндра. Чрезвычайно важно, чтобы соединение двух кусков в один совершалось в очень короткий отрезок времени. Ибо при медленном соединении зарядов цепная реакция может начаться, выделится зна-

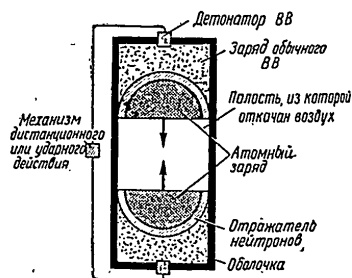
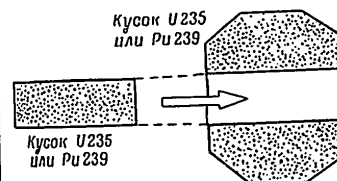


Рис. 45. Принципиальная схема устройства атомной бомбы с зарядом, раз-

чительное количество теплоты задолго до того, как в цепную реакцию будет вовлечена значительная часть заряда урана, и в результате куски разобьются; так как каждый из них имеет массу меньше критической, то цепная реакция деления оборвется. Другой причиной обрыва цепной реакции деления может быть превращение в пар заряда урана и его рассеивание после разрыва оболочки до того, как его атомные ядра вступят в реакцию деления. Поэтому первым условием является требование почти мгновенного контакта обоих зарядов делящегося материала.

Очевидно, что сила взрыва будет тем больше, чем больше в короткий отрезок времени вступит атомов урана в реакцию деления, и вообще чем больше будет коэффициент использования делящегося материала, т. е. чем больше успеет разделиться атомных ядер. Поскольку делящийся материал представляет собой большую ценность и его необходимо наилучшим образом использовать, чтобы максимально большое число атомов



В момент соединения обоих кусков общая масса больше критической, что обуславливает взрыв

трояства атомной бомбы с зарядом, раз-

вступило в реакцию деления, то заряд следует окружить отражателем нейтронов. Это нужно для того, чтобы нейтроны, если и вылетят за пределы куска заряда делящегося материала во время развития цепной реакции, то хотя бы в небольшой доле вернулись вновь в кусок заряда для участия в развитии цепной реакции.

Как говорилось выше, абсолютно отражающих нейтроны сред не существует, поэтому можно говорить о части нейтронов, отраженных в зону ядерной реакции. В качестве отражателя нейтронов можно использовать, например, графит или окись бериллия. Применение отражателей нейтронов повысит коэффициент использования делящегося материала и тем самым увеличит силу взрыва.

Оболочка бомбы задерживает разлет атомного заряда, чем способствует более полному протеканию ядерной реакции и, следовательно, увеличивает мощность взрыва. Кроме того, она также отражает нейтроны в зону реакции.

Вот почему представляется целесообразным атомный заряд вместе с отражателем нейтронов окружить толстой стальной стенкой (оболочкой), чтобы предупредить возможность раскалывания монолитного куска делящегося материала, образовавшегося путем соединения обоих зарядов, на части с массами меньше критического значения, ибо тогда цепная реакция деления не охватит значительную массу делящегося материала. Дело заключается в том, что, например, кусок урана 235 является куском металла, и ему, как и всякому металлу, свойственно наличие мельчайших трещин молекулярного размера. Эти трещины могут быть невидимыми, даже с помощью сильных микроскопов. И вот после соединения обоих зарядов, когда начнется цепная реакция деления и

быстро начнет повышаться температура, кусок урана может распасться по этим трещинам и в разные стороны разлетятся кусочки урана, цепная реакция оборвется — делящийся материал не будет использован для взрыва. Поэтому надо, хотя на первое мгновение предупредить раскалывание куска делящегося материала, а для этого его надо держать с помощью толстой стальной оболочки.

Преждевременному разлету атомного заряда в момент взрыва бомбы препятствует также давление газообразных продуктов взрыва заряда обычного взрывчатого вещества. В дальнейшем эта стальная оболочка, как бы прочна она ни была, не помешает взрыву, ибо температура, которая может в момент взрыва измеряться миллионами градусов, обусловит превращение этой оболочки в пар, а к тому же для возникших огромных давлений эта оболочка, даже если не успеет превратиться в пар, не окажет никаких помех развитию взрыва. Часть вещества атомного заряда не успевает вступить в ядерную реакцию и разлетается вместе с оболочкой.

Итак, принцип взрыва атомной бомбы состоит в мгновенном объединении двух или больше кусков заряда делящегося материала, каждый с массой меньше критической, в один кусок заряда с массой больше критической. Приведенная схема позволяет предсказать возможность устройства атомных бомб различного калибра, то есть бомб, дающих разной силы взрыв — от нескольких тысяч тонн до сотен тысяч тонн тротила в зависимости от количества делящегося материала.

Действительно главное условие для рассмотренной конструкции состоит в следующем: $M' < M'_k$; $M'' < M''_k$; $M' + M'' > M'_k$, если образу-

щийся кусок заряда делящегося вещества состоит из двух кусков, имеет форму сплошного цилиндра. Очевидно, если массу заряда M' взять близкой к критической, то масса заряда M'' может быть различной, но так, чтобы она не превышала критического значения. Например, допустим, что M'_k равно 3 кг, а M''_k 7 кг, при этих условиях предположим, что ради безопасности массу куска заряда делящегося материала можно допускать не больше, чем на 0,5 кг отличающейся от критической массы. Таким образом, взрыв может быть осуществлен при массе одной части заряда в 2,5 кг и массе другой части заряда от 0,5 кг до 6,5 кг. Следовательно, взрыв может быть осуществлен с общей массой делящегося материала в 3 кг как нижнего предела и 9 кг как верхнего предела. Раз представляется возможность использовать различные массы делящегося материала, то, очевидно, взрывы будут разной силы, а потому и бомбы будут разного калибра.

Приведенная схема устройства атомной бомбы и принцип ее действия показывают, что при данной общей конструкции в качестве взрывчатого начала нельзя применять сколь угодно большие количества делящегося материала, например урана 235. Максимально возможное, предельное количество делящегося материала в атомной бомбе не может превышать сумму критических масс $M'_k + M''_k$, ибо в противном случае один из кусков или даже оба будут иметь массу больше критической, что невозможно.

Казалось бы, что усилить взрыв можно путем увеличения числа кусков делящегося материала, объединяемых в один, ибо тогда масса делящегося материала может быть резко увеличена, по-

скольку каждый из кусков по массе может быть близок к критическому. Однако этот путь практически трудно реализуем, так как цепная реакция деления завершается в промежуток времени, меньший одной миллионной секунды, и опоздание одного из кусков даже на одну миллионную долю секунды приведет к тому, что этот кусок не примет участия в цепной реакции деления, и он не только не будет использован, но превратится в пар и погибнет, как ценный материал. Таким образом, указанная схема действия атомной бомбы не позволяет силу ее взрыва сделать сколь угодно большой путем увеличения массы делящегося материала.

Разрушительное действие атомного взрыва оценивается обычно величиной тротилового эквивалента, тем количеством тротила, которое при взрыве дало бы такой же эффект.

Американские атомные бомбы, сброшенные в 1945 году над японскими городами Хиросима и Нагасаки, имели общую массу атомного заряда в каждой из бомб около 50 кг U^{235} , либо Pu^{239} , а коэффициент полезного использования — около 2%. Таким образом, в этих бомбах из 50 кг урана или плутония фактическому делению подверглось лишь около 1 кг, что соответствует по величине энергии взрыва около 20 000 т тротила.

Взорванные в 1945—1957 гг. атомные бомбы имели, в зависимости от калибра, тротиловые эквиваленты от нескольких тысяч тонн до сотен тысяч тонн.

17. ЭФФЕКТ ВЗРЫВА АТОМНОЙ БОМБЫ

Когда говорят об атомном оружии, то имеют в виду два его вида: атомное оружие взрывного действия и боевые радиоактивные вещества.

В настоящее время атомное оружие взрывного действия известно в виде атомных и водородных бомб, атомных артиллерийских снарядов, торпед, ракет и самолетов-снарядов.

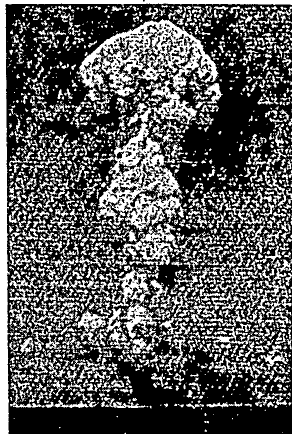


Рис. 46. Грибовидное облако при воздушном взрыве атомной бомбы

Боевые радиоактивные вещества — это специальноготавливаемые радиоактивные смеси в виде жидкостей и порошков. Ими могут быть снаряжены авиационные бомбы, ракеты, реактивные мины.

Атомный взрыв может быть произведен в воздухе на высоте до нескольких сотен метров, у поверхности земли (воды) и под землей (водой).

В соответствии с этим атомные взрывы называют воздушными, наземными (надводными) и подземными (подводными).

Одной из важных особенностей каждого вида взрыва является различная степень радиоактивного заражения местности.

При воздушном взрыве (рис. 46) радиоактивное заражение местности незначительно, так как продукты атомного взрыва быстро поднимаются вверх мощным потоком сильно нагретого воздуха. Большая часть их, не причинив вреда, уносится облаком и рассеивается на очень большой площади.

Местность, над которой произошел воздушный атомный взрыв, можно преодолевать в любом направлении сразу после взрыва, принимая при этом необходимые меры защиты.

При наземном взрыве радиоактивные вещества, смешиваясь с грунтом, быстро оседают на землю. Заражение местности в районе атомного взрыва и по пути движения облака в этом случае может оказаться значительным.

При подводном взрыве (рис. 47) сильному заражению подвергаются вода и корабли, находящиеся вблизи места взрыва. Кроме того, при подводном взрыве образуется огромное количество радиоактивной водяной пыли (тумана), распространяющейся с большой скоростью во все стороны от центра взрыва. Если взрыв происходит недалеко от берега, то водяная пыль может стать причиной заражения прибрежной местности, порта, военно-морской базы, населенного пункта.

Какова внешняя картина атомного взрыва? В момент атомного взрыва возникает ослепительно яркая вспышка. Даже в солнечный день

она озаряет местность и небо на десятки километров от места взрыва. Вслед за вспышкой при воздушном взрыве образуется огненный шар (при наземном — полушарие). В течение нескольких секунд он светится. Огненный шар можно видеть с очень большого расстояния. Быстро увеличиваясь, он поднимается вверх и, остывая, превращается в клубящееся облако. Одновременно

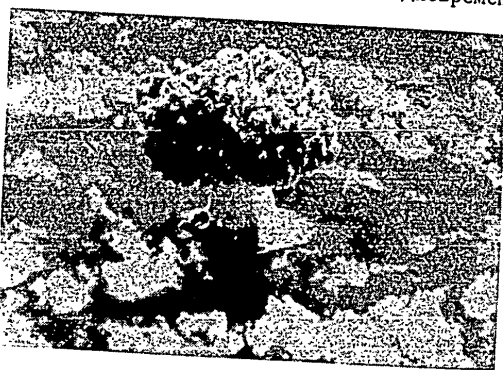


Рис. 47. Внешняя картина подводного атомного взрыва

с земли поднимается столб пыли и дыма, в результате чего облако атомного взрыва приобретает форму гриба. Облако достигает высоты в несколько километров. Поднимаясь, оно постепенно расширяется и рассеивается. Пыль, поднятая с земли в районе атомного взрыва, удерживается в воздухе 10—30 минут, затрудняя наблюдение за полем боя.

При подводном взрыве в воздух поднимается огромный столб воды, над которым возникает

178

большое облако. В результате обрушения этого столба образуется масса водяной пыли, которая, распространяясь во все стороны от центра взрыва, превращается в густой туман. Кроме того, при подводном взрыве образуются волны, высота которых достигает 20—30 метров.

Атомный взрыв любого вида сопровождается сильным звуком.

Рассмотрим эффект атомного взрыва. Прежде всего, надо иметь в виду, что развитие цепной реакции деления атомных ядер сопровождается: 1) образованием «осколков», — новых возникших атомов, движущихся с огромными скоростями; 2) образованием облака свободных нейтронов, число которых увеличивается с развитием цепной реакции и достигает огромного значения; так в момент окончания взрыва атомной бомбы (тротильный эквивалент 20 тысяч тонн) свободными являются $3 \cdot 10^{22}$ быстрых нейтрона (энергия ~ 3 Мэв) и $3 \cdot 10^{23}$ медленных нейтрона; 3) интенсивным гамма-излучением, возникающим в момент деления ядер и в результате радиоактивного распада «осколков»; 4) интенсивным излучением рентгеновых, ультрафиолетовых и видимых лучей, возникающих вследствие возникновения свободных ионов (электрически заряженных атомов).

Все указанное заставляет представить себе следующим образом взрыв атомной бомбы. В месте взрыва образуется огненное газовое облако с очень высокой температурой внутри него и, вероятно, имеющее на своей поверхности температуру порядка сотен тысяч градусов. Как упоминалось выше, при рассмотрении самопроизвольного деления атомных ядер, деление ядер одного килограмма урана в одном кубическом

12*

179

дециметре может создать давление порядка миллиардов атмосфер. Поэтому в момент завершения цепной реакции деления, которая в основном протекает в одну миллионную долю секунды и заканчивается уже в газовом облаке, возникает огненный шар с огромным мгновенным давлением в нем, что обуславливает создание ударной (взрывной) волны, распространяющейся от центра взрыва в различных направлениях.

Из чего же состоит этот огненный шар и образующееся из него газовое облако? Прежде всего из «осколков» атомов делящегося материала, т. е. атомов с порядковыми номерами, лежащими в интервале примерно от № 30 до № 62. Все эти «осколки», являясь ионами с незавершенными электронными оболочками, радиоактивны, испытывают бета-распад. Поэтому это газовое облако будет содержать свободные электроны, которые, правда, могли возникнуть и не только от бета-распада. В газовом облаке будут содержаться атомы тех элементов, которые входили в состав оболочки атомной бомбы и всего ее содержимого, поскольку из-за высокой температуры все вещества бомбы будут в газовом состоянии.

Если взрыв атомной бомбы будет произведен в воздухе, то в скором времени после возникновения газового облака в его поверхностный слой войдут и ионы, возникающие из молекул воздуха. В последующие моменты это газовое облако может быть окрашенным в бурый цвет не только за счет пыли, которая будет под влиянием вихревых движений засасываться в него из-за вертикального движения вверх газового облака, но и за счет образования, например, окислов азота из воздуха; как известно, двуокись азота окрашена в бурый цвет.

Таким образом, эффект взрыва атомной бомбы зависит от следующих факторов:

- 1) ударной волны;
- 2) светового излучения, вызывающего пожары и загорание предметов, способных гореть;
- 3) проникающей радиации, состоящей из:
 - а) гамма-радиации, вызывающей интенсивную ионизацию в воздухе и во всех предметах на поверхности земли;
 - б) свободных нейтронов, вызывающих вследствие их захвата атомами элементов, входящих в почву, искусственную радиоактивность;
- 4) радиоактивного заражения местности. Возникновение радиоактивной пыли за счет «осколков» от деления ядерного «горючего» и распыления почвы с образовавшимися в ней радиоактивными изотопами.

Не вдаваясь в подробное описание всех произведенных взрывов атомных бомб, средств и способов защиты, достаточно указать, что вызванные ударной волной взрывов механические разрушения огромны. Световое излучение атомного взрыва может вызвать большие пожары, как, например, в городах Хиросима и Нагасаки. Проникающая радиация в форме гамма-лучей и потока нейтронов в больших дозах губительна для живых организмов; например, если поток нейтронов, падающий на человека, таков, что на каждый квадратный сантиметр поверхности человека падает $5 \cdot 10^{11}$ медленных или 10^{11} быстрых нейтронов, то этот поток очень опасен для жизни человека.

Изучение действия гамма-лучей на вещество показало, что гамма-фотон, попадая внутрь вещества, может терять свою энергию тремя путями. Первый из них — фотоэффект — состоит в том, что

гамма-фотон передает свою энергию электрону атома, сам превращаясь в электрическое поле. В этом случае электрон вылетает из атома с кинетической энергией, в которую перешла энергия фотона. Этот эффект имеет существенное значение для гамма-фотонов с энергией, меньшей 1 Мэв. Так или иначе, ослабление гамма-лучей в веществе пропорционально плотности в нем электронов, то есть числу электронов в одном миллилитре.

Вторым путем передачи энергии фотоном веществу является комптон-эффект. В этом случае фотон, попадая внутрь вещества, встречаясь с электроном, передает последнему часть своей энергии; при этом из атома вылетает электрон (так называемый комптоновский электрон) с некоторой кинетической энергией и одновременно с вылетом электрона образуется другой фотон с меньшей энергией, а значит с меньшей частотой колебаний и большей длиной волны (комптоновский фотон). Эта форма передачи энергии ослабляет интенсивность гамма-лучей, и уменьшение энергии также пропорционально числу электронов в одном миллилитре вещества.

Третий путь передачи фотоном своей энергии состоит в том, что фотон, если его энергия больше 1,02 Мэв, вблизи от атомного ядра превращаясь в электрон и позитрон, которые, восприняв энергию фотона, вылетают из атома. Эта форма под названием образования пар проявляет себя чаще всего для фотонов с большой энергией и при большем заряде ядра. В конечном счете ослабление гамма-лучей в веществе за счет образования пар, также пропорционально плотности электронов.

Таким образом, общее ослабление гамма-луча

в веществе за счет фотоэффекта, комптон-эффекта и образования пар пропорционально плотности электронов в веществе n , т. е. введя коэффициент пропорциональности σ , можно ослабление гамма-луча в веществе выразить формулой σn . Если ради простоты принять, что вещество состоит из одного элемента с числом Менделеева Z и что его плотность равна d , а атомный вес элемента равен A , и число Авогадро N , то ослабление гамма-луча можно представить формулой

$$\sigma \frac{d}{A} NZ = \sigma N d \frac{Z}{A}.$$

Для легких элементов, как об этом указывалось выше, $\frac{Z}{A} = 0,5$, а для тяжелых типа барий ($Z = 56$, $A = 136$) $\frac{Z}{A} = \frac{56}{136} = 0,41$, т. е. примерно для всех элементов отношение $\frac{Z}{A}$ равно 0,5—0,4. Поэтому ослабление гамма-лучей веществом главным образом определяется плотностью, то есть массой единицы объема. Масса единицы объема же обычно велика у веществ с большим атомным весом, у твердых веществ, содержащих элементы с большим числом Менделеева Z . Поэтому лучшей защитой от гамма-лучей на атомных предприятиях является свинец ($Z = 82$) или вещества, содержащие барий ($Z = 56$). Вещества, содержащие другие элементы с большими порядковыми номерами, обычно не используют, так как они дороги и экономически нецелесообразно их использовать для целей защиты от гамма-лучей.

Защитой от медленных нейтронов могут служить бор и его соединения, например, борная

кислота (H_3BO_3), кадмий (Cd) и его соединения. Радиоактивная пыль не только вредна тем, что образует поток гамма-излучения, но, попадая через легкие в организм человека, она за счет создаваемых ею гамма-излучения и бета-излучения может вызвать серьезные болезненные явления. Для характеристики состава радиоактивной пыли, образующейся при взрыве атомной бомбы, рассмотрим составные части продуктов деления с наибольшей интенсивностью радиоактивности в различные моменты времени после взрыва бомбы. Ниже, в таблице, приведены те элементы, которые содержатся среди «осколков» деления с наибольшей интенсивностью радиоактивности в разные моменты времени; рядом с химическим обозначением в скобках написаны числа Менделеева (порядковые номера).

Через 1 час	Через 1 день	Через 1 неделю	Через 1 месяц	Через 1 год
редко-земельные элементы (58-71)	редко-земельные элементы (58-71)	редко-земельные элементы (58-71)	редко-земельные элементы (58-71)	редко-земельные элементы (58-71)
Te (52)	J (53)	J (53)	Ba (56)	Nb (41)
Ba (56)	Zr (40)	Te (52)	Zr (40)	Zr (40)
J (53)	Nb (41)	Ba (56)	Ru (44)	Sr (38)
Rb (37)	Xe (54)	Mo (42)	Rh (45)	Ru (44)
Kr (36)	Sr (38)	Xe (54)	Nb (41)	Rh (45)
Sr (38)	Mo (42)	Zr (40)	J (53)	Ba (56)
Xe (54)	Te (52)	Sr (38)	Xe (54)	
Mo (42)	Rh (45)	Ru (44)		

При рассмотрении этой таблицы становится очевидным, что «осколки» непрерывно меняют свой химический состав и среди «осколков» с наибольшей интенсивностью радиоактивности

содержатся весьма различные по своим химическим свойствам элементы. Поэтому защита людей от радиоактивной пыли, а также проблема удаления «осколков» с целью обеззараживания местности или тех или иных предметов должны решаться не одинаково в разные моменты после возникновения «осколков» как продуктов деления.

Мероприятия по защите от атомного оружия проводятся непрерывно не только во всех видах боя, но и при нахождении войск в глубоком тылу. Они имеют целью обеспечить войска от непосредственного воздействия этого оружия и сохранить их боевую готовность.

В целях противоатомной защиты предусматривается ведение разведки средств нападения противника, уничтожение их, маскировка, а также ряд мероприятий по защите от поражающего действия атомного оружия.

Защита войск от поражающего действия атомного оружия достигается умелым использованием защитных свойств местности и фортификационных сооружений; ведением радиационной разведки; быстрым и правильным использованием индивидуальных и коллективных средств противохимической защиты; санитарной обработкой личного состава, а также дезактивацией оружия, боевой техники, обмундирования, снаряжения и позиций в случае заражения их радиоактивными веществами.

18. АТОМНЫЙ РЕАКТОР КАК ИСТОЧНИК ПОЛУЧЕНИЯ ПЛУТОНИЯ 239

Большая стоимость выделения чистого изотопа урана 235 требует больших затрат. Например, по данным зарубежной печати, заводы, выделяю-

щие в США уран 235 диффузионным путем, потребляют огромное количество электроэнергии и для обслуживания их предназначены электростанции общей мощностью в миллионы квт. Все это выдвинуло вопрос о производстве других делящихся материалов, таких элементов, для деления атомных ядер которых энергия активации деления меньше энергии связи одного нуклона. Внимание исследователей привлек к себе изотоп плутония, именно плутоний 239 (${}_{94}\text{Pu}^{239}$). Этот изотоп, как показало тщательное изучение его свойств в отношении расщепления атомных ядер, аналогичен изотопу урана 235. Он, так же как и последний, расщепляется быстрыми и медлен-

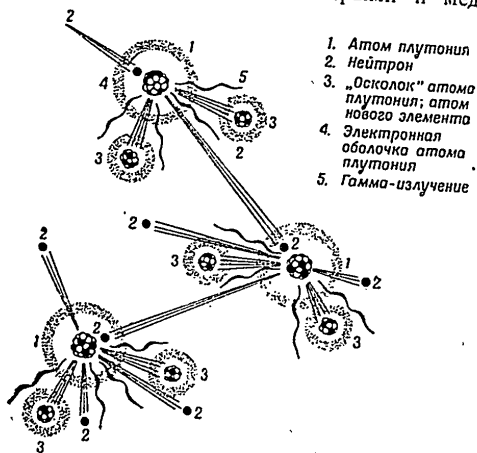
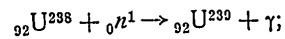


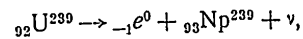
Рис. 48. Схема цепной реакции деления ядер плутония 239

ными нейтронами; схема подобного расщепления изотопа Pu^{239} приведена на рис. 48.

Плутоний 239 был приготовлен бомбардировкой природного урана медленными нейтронами. Схема образования этого изотопа такова. Изотоп урана 238 поглощает медленные нейтроны



греческой буквой гамма (γ) обозначен фотон гамма-излучения. Образующийся изотоп урана — уран 239 (U^{239}) — из-за избытка в его ядрах нейтронов по сравнению с ядром сравнительно устойчивого урана 238 испытывает β^- -распад с периодом полураспада 23,54 мин., образуя изотоп нептуния (${}_{93}\text{Np}^{239}$)



где ${}_{-1}e^0$ означает β^- -частицу, то есть электрон, а ν — нейтрино. Возникший изотоп нептуния оказывается также β^- -радиоактивен и с периодом полураспада 2,33 дня превращается в изотоп плутония — плутоний 239

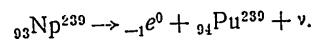
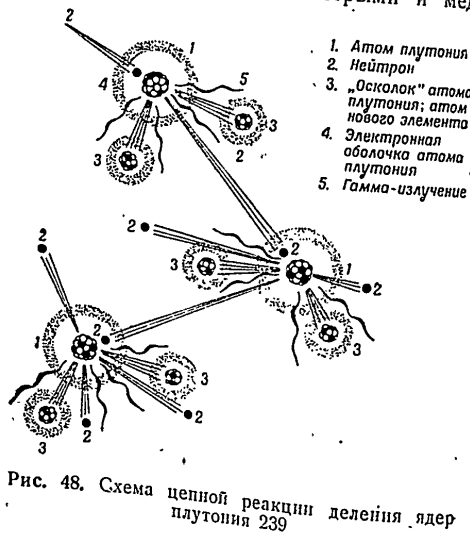


Схема образования изотопа плутония 239 из урана 238 путем бомбардировки последнего медленными нейтронами изображена на рис. 49.

Таким образом, бомбардировка урана нейтронами приводит к тому, что внутри урана образуется новый химический элемент — плутоний (порядковый номер 94), который по своим химическим свойствам должен существенно отличаться от урана, вследствие чего его сравнительно легко химически выделить из урана.

в США уран 235 диффузионным путем потребляют огромное количество электроэнергии для обслуживания их предназначены электростанции общей мощностью в миллионы квт. Все это выдвинуло вопрос о производстве других делящихся материалов, таких элементов, для деления атомных ядер которых энергия активации деления меньше энергии связи одного нуклона. Внимание исследователей привлек к себе изотоп плутония, именно плутоний 239 (${}_{94}\text{Pu}^{239}$). Этот изотоп, как показало тщательное изучение его свойств в отношении расщепления атомных ядер, аналогичен изотопу урана 235. Он, так же как и последний, расщепляется быстрыми и медлен-

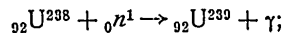


186

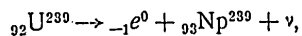
Рис. 48. Схема цепной реакции деления ядер плутония 239

ными нейтронами; схема подобного расщепления изотопа Pu^{239} приведена на рис. 48.

Плутоний 239 был приготовлен бомбардировкой природного урана медленными нейтронами. Схема образования этого изотопа такова. Изотоп уран 238 поглощает медленные нейтроны



греческой буквой гамма (γ) обозначен фотон гамма-излучения. Образующийся изотоп урана — уран 239 (U^{239}) — из-за избытка в его ядрах нейтронов по сравнению с ядром сравнительно устойчивого урана 238 испытывает β^- -распад с периодом полураспада 23,54 мин., образуя изотоп нептуния (${}_{93}\text{Np}^{239}$)



где ${}_{-1}e^0$ означает β^- -частицу, то есть электрон, а ν — нейтрино. Возникший изотоп нептуния оказывается также β^- -радиоактивен и с периодом полураспада 2,33 дня превращается в изотоп плутония — плутоний 239

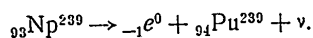


Схема образования изотопа плутония 239 из урана 238 путем бомбардировки последнего медленными нейтронами изображена на рис. 49.

Таким образом, бомбардировка урана нейтронами приводит к тому, что внутри урана образуется новый химический элемент — плутоний (порядковый номер 94), который по своим химическим свойствам должен существенно отличаться от урана, вследствие чего его сравнительно легко химически выделить из урана.

187

На рис. 49 изображена схема образования плутония 239 из урана 238 при облучении последнего нейтронами; стрелками изображен переход атома урана 238 в атом урана 239 и последнего в атом нептуния 239 и затем в атом плутония 239. В 1942 году было получено вначале 2 μg ($\frac{2}{1000000}$ грамма), а затем 20 μg плутония 239; были изучены его химические и физические свойства, а также было установлено, что в отношении деления его атомных ядер, как об этом говорилось выше, он подобен урану 235 и, следовательно, может служить в качестве взрывчатого материала для атомных бомб.

Изучение свойства плутония 239 показало, что он альфа-радиоактивен и период полураспада для него равен 24 360 лет, так что его можно накапливать без опасения существенной убыли за счет радиоактивного распада. Отмеченная выше аналогия плутония 239 и урана 235 в отношении деления и сравнительно легкое его получение в атомном реакторе, как будет показано ниже, сделали этот элемент одним из важнейших среди расширяющихся материалов.

Каким же образом получить плутоний 239 в больших количествах? Следует иметь в виду, что в урановых рудах содержится плутоний в количестве 10^{-12} % (одна часть на 10^{14} частей руды), то есть в столь малом количестве, что извлекать его из этих руд совершенно нерентабельно. Для целей промышленного получения было осуществлено образование плутония из урана 238 за счет цепной реакции деления изотопа урана 235, находящегося наряду с ураном 238 в природном уране. Выше уже указывалось, что в природном чистом уране цепная реак-

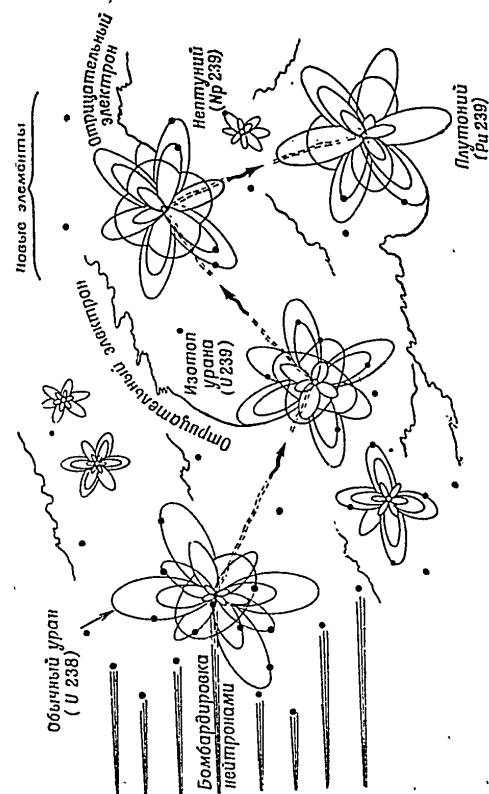


Рис. 49. Схема образования плутония 239 в куске природного урана при его бомбардировке медленными нейтронами

ция развиваться не может из-за присутствия изотопа U^{238} .

Следует иметь в виду, что расщепление атомных ядер урана 235 особенно легко осуществляется медленными нейтронами. Поэтому, если разделится какое-либо атомное ядро изотопа U^{235} под действием нейтрона, попавшего в кусок урана извне или возникшего внутри куска, то образующиеся при делении нейтроны, казалось бы, сталкиваясь с атомными ядрами урана 238, находящегося в относительно очень большом количестве в природном уране ($U^{235} : U^{238} = 1 : 140$), должны потерять свою скорость, сделаться медленными и когда-нибудь, столкнувшись с ядром атома U^{235} , вызвать его деление. Таким образом, на первый взгляд цепная реакция должна развиваться в куске природного урана, если кусок достаточно велик, чтобы относительно немного нейтронов удалялось из этого куска сквозь его поверхность.

Поскольку на деление ядра потребляется один нейтрон, а образуется при делении в среднем 2,5 нейтрона, то по мере развития цепной реакции число свободных нейтронов будет возрастать и часть их пойдет на образование плутония 239 по выше приведенной схеме. Однако все же в чистом уране цепная реакция развиваться не может, и помехой ей является способность урана 238 поглощать нейтроны. Оказывается, из-за большого различия масс ядра атома урана 238 и свободного нейтрона, нейтрон при соударении с ядрами атомов урана 238 будет терять свою энергию очень малыми порциями, и поэтому свободный нейтрон, сталкиваясь с атомными ядрами урана 238, будет постепенно уменьшать свою энергию. Однако способность атомного ядра

190

урана 238 поглощать нейтрон увеличивается с уменьшением скорости нейтрона, то есть с уменьшением энергии нейтрона, и эта способность особенно велика для энергии нейтрона 7 эв^1 , называемой энергией резонансного захвата. Если это графически изобразить на плоскости с помощью

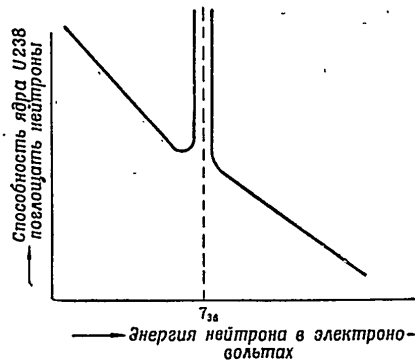


Рис. 50. Зависимость способности к захвату медленных нейтронов ядрами урана 238 от энергии нейтронов

прямоугольной системы координат, откладывая по горизонтали (оси абсцисс) энергию нейтрона, а по вертикали (оси ординат) способность ядра урана 238 поглощать нейтрон, выраженную в каких-либо единицах, то получится кривая, изображенная на рис. 50.

¹ По некоторым данным, резонансный захват имеет место при энергии нейтрона «непосредственно выше значения энергии 1 эв». См. книгу «Актиниды» под ред. Г. Сиборга и Дж. Каца. Издательство иностранной литературы, 1956 г., стр. 42.

191

Таким образом, для энергии нейтрона 7 эв способность ядра атома урана ^{238}U поглощать нейтроны чрезвычайно велика, а потому нейтроны, образовавшиеся при делении ядра атома урана ^{235}U , имея вначале энергию около 1 Мэв , будут в результате столкновений с ядрами урана ^{238}U постепенно терять свою энергию. Когда эта энергия станет равной 7 эв , то первое же столкновение с ядром атома урана ^{238}U приведет к захвату нейтрона этим ядром. Поэтому в чистом куске природного урана нейтроны не смогут снизить свою энергию до величины, меньшей 7 эв , они будут захвачены, и не останется нейтронов для расщепления атомных ядер урана ^{235}U , то есть для продолжения цепной реакции деления и образования новых нейтронов.

Следовательно, в чистом природном куске урана цепная реакция деления не может развиваться ни за счет атомных ядер урана ^{238}U , ни за счет урана ^{235}U . Из сказанного ясно, что для развития цепной реакции в куске природного урана необходимо создать такие условия замедления нейтронов, при которых нейтроны «проскакивали» значение энергии 7 эв и не делались добычей резонансного захвата.

Но как же замедлить нейтроны? Единственный путь замедления нейтрона, это заставить его соударяться с атомными ядрами. Теоретические расчеты показали, что особенно быстро замедляют нейтроны вещества, содержащие легкие атомные ядра, как, например, ядра атомов водорода, легкого и тяжелого изотопов водорода — протия и дейтерия. Ниже, в таблице, приведено число соударений, которое должен испытать нейтрон об атомные ядра, чтобы его энергия снизилась от величины $1,75 \text{ Мэв}$ до $0,025 \text{ Мэв}$.

192

Ядро замедлителя	H ¹	H ²	He ⁴	Be ⁹	C ¹²	O ¹⁶	U ²³⁸
Число соударений	18	24	41	50	110	145	2100

Рассматривая данные таблицы, легко сделать вывод, что лучшим замедлителем является водород в виде изотопа H¹ или H²; поэтому в лабораториях в качестве замедлителя нейтронов часто применяют парафин как вещество, состоящее только из водорода и углерода.

На стр. 194 приведена таблица, характеризующая замедляющую способность парафина.

Сопоставляя данные, приведенные в этой таблице, можно заключить, что для развития цепной реакции в природном уране необходимо сочетать уран и эффективный замедлитель. Система из замедлителя и урана, в которой развивается цепная реакция деления, называется атомным котлом или атомным реактором.

Ядерный реактор представляет собой установку, в которой может поддерживаться управляемая цепная реакция деления ядер. Известно несколько типов ядерных реакторов. В соответствии со скоростью нейтронов, вызывающих реакцию деления, их подразделяют на реакторы с медленными (тепловыми), промежуточными и быстрыми нейтронами. Наиболее распространенными являются реакторы с медленными нейтронами, которые в свою очередь подразделяются на гетерогенные (неоднородные) и гомогенные (однородные).

В гетерогенном реакторе активная зона, то есть зона, в которой протекает реакция деления и происходит выделение энергии, представляет

13-563

193

	Энергия нейтронов				
	1 Мэв	0,01 Мэв	100 эв	10 эв	1 эв
Скорость в м/сек	$1,38 \cdot 10^7$	$1,38 \cdot 10^6$	138 400	43 750	13 840
Промежуток времени в миллионных долях секунды, нужный для прохождения 1 м	0,0723	0,723	7,23	22,9	72,3
Среднее число соударений с ядрами атомов в парафине, необходимое для понижения энергии от 7 Мэв до данного значения	2	7	11	14	16
Средний путь в см, проходимый между двумя соударениями	4	0,8	0,7	0,7	0,7
Промежуток времени в миллионных долях секунды, нужный для данного замедления	0,005	0,03	0,2	0,7	2

194

собой решетку из урана, расположенную в среде замедляющей нейтроны до тепловых скоростей (2000 м/сек). Решетка может состоять из стержней или блоков металлического урана или представлять собой раствор урана в расплавленном металле, перемещающийся по трубам, расположенным в замедлителе. Замедлителем обычно служит чистый графит или тяжелая вода.

В гомогенном реакторе активная зона представляет собой однородную смесь урана и замедлителя. Это может быть, например, твердая смесь порошкообразного урана и графита (в этом случае уран должен быть обогащен изотопом U^{235}) или жидкий раствор соли урана в тяжелой воде.

Рассмотрим теперь некоторые характерные особенности ядерного реактора. Как мы указывали выше, различают гомогенные реакторы, являющиеся растворами соли урана, сильно обогащенной изотопом U^{235} , в тяжелой или обычной дистиллированной воде, в которых вода играет роль замедлителя, и гетерогенные реакторы, в которых блоки урана переложены брусками графита (почему иногда эти реакторы называют штабелями).

Для характеристики обоих типов реакторов достаточно сказать, что в гомогенных реакторах (по данным иностранной печати) на 3 т урана необходимо примерно 5 т воды (H_2O или D_2O) в качестве замедлителя, в то время как в гетерогенных реакторах на 25 т урана приходится около 650 т графита. Рассмотрим сейчас работу гетерогенного реактора.

Гетерогенный реактор можно себе представить в виде штабеля, составленного из брусков урана и брусков графита. Из-за химической активности урана бруски заключают в тонкие чехлы из алю-

13*

195

миниовой жести, Нейтрон, попавший в реактор извне, в конце концов попадает в урановый брусок, где он может столкнуться с ядром тяжелого изотопа (U^{238}) или ядром легкого изотопа (U^{235}). Вероятность первого случая примерно в 140 раз больше второго, поэтому скорее можно ожидать столкновения нейтрона с ядром тяжелого изотопа. Пока нейтрон обладает большой скоростью, он не будет поглощаться ядром атома урана при соударении и в конце концов попадет в графит, где, сталкиваясь с ядрами атомов углерода, понизит свою скорость и, уже замедлившись, попадет в тот или другой брусок урана. Если теперь нейтрон столкнется с ядром тяжелого изотопа, то он не поглотится, а упруго отразится, пока в конце концов не столкнется с ядром урана 235 , ядро урана 235 при этом расщепится на два «осколка», причем возникают 2 или 3 свободных нейтрона, с которыми начнутся изменения в той же последовательности. Если же нейтрон, потеряв большую часть своей энергии в замедлителе, попадет в блок урана с энергией 7 эв, то, столкнувшись с ядром тяжелого изотопа, он будет им захвачен, и из этого ядра в конце концов образуется ядро атома плутония 239 .

Теория и опытные данные показывают, что число свободных нейтронов понемногу увеличивается в реакторе.

Откуда же берутся свободные нейтроны? Во-первых, они возникают при расщеплении ядер изотопа 235 , во-вторых, они получаются как запыдающие от «осколков», получившихся при делении ядер изотопа урана 235 и, в-третьих, они возникают от полного разрушения атомных ядер внутри реактора от действия космических лучей и, наконец, они попадают в реактор извне, как

свободные нейтроны, получившиеся вне реактора от полного расщепления атомных ядер космическими лучами.

Как же расходуются нейтроны внутри реактора? Прежде всего значительная часть идет на развитие цепной реакции делений, то есть на расщепление атомных ядер урана 235 . Некоторая часть поглощается ядрами тяжелого изотопа урана 238 и ядрами урана 235 ; в последнем случае образуются ядра урана 236 , не испытывающие расщепления и являющиеся альфа-радиоактивными с большим периодом полураспада. Некоторая часть нейтронов поглощается замедлителем и примесями в графите и уране (поглощение замедлителем является неизбежным). От примесей необходимо заранее избавляться; следует использовать графит особой чистоты и предварительно тщательно очищать уран. 1 : 500 000 частей бора в графите делает последний негодным в качестве замедлителя. Наконец, некоторая часть нейтронов рассеивается, вылетает из реактора. Если всем видам расходов дать количественную оценку, то можно составить таблицу, приведенную ниже.

Вид расхода свободных нейтронов в реакторе	Относительная доля расхода
На цепной процесс	1,0
Поглощение $U^{239} \rightarrow U^{239} \rightarrow Pu^{239}$	0,9
Поглощение $U^{235} \rightarrow U^{236}$	0,2
Поглощение замедлителем	0,3
Поглощение примесями (например, «осколками»)	0,05
Рассеяние из реактора	0,09
На контроль работы реактора	0,02
	2,56

Процесс самопроизвольного радиоактивного распада нейтронов, осуществляющийся с периодом полураспада 12,8 мин., обуславливает малый ($10^{-6}\%$) расход свободных нейтронов, которым можно пренебречь.

Таким образом, реактор будет нормально работать, если число возникающих свободных нейтронов равно числу расходуемых. Если же расходуемых нейтронов больше, чем получающихся свободными, то реактор перестает работать, и цепная реакция в нем прекратится.

Однако могут быть случаи, когда число свободных нейтронов возрастает с течением времени, тогда реактор начинает работать все интенсивнее и интенсивнее, что может привести к его полному разрушению. Чтобы предупредить это, в реактор вводятся специальные стержни — регуляторы из бористой стали или из некоторых сплавов кадмия; бор и кадмий обладают большой поглощательной способностью в отношении медленных нейтронов. Поэтому введение стержней внутрь реактора уменьшает число свободных в нем нейтронов за счет их поглощения и тем самым снижает интенсивность работы реактора.

Таким образом, регулировка работы реактора сводится к введению в реактор и вытаскиванию из него регулировочных стержней.

В зарубежной литературе приводится много примеров баланса нейтронов. Ниже на рис. 51 приведена схема расходования нейтронов, дающая несколько иные данные, нежели приведенные выше.

Таким образом, в реакторе возникают атомы плутония в количестве на 4 разделившихся атома U^{235} — 3 атома Pu^{239} . Следует, однако, иметь в виду, что изотоп плутоний 239 испытывает деле-

ние медленными нейтронами, подобно изотопу — уран 235, поэтому по мере работы реактора образовавшийся плутоний 239 включается в цепную реакцию деления, заменяя собой изотоп урана 235.

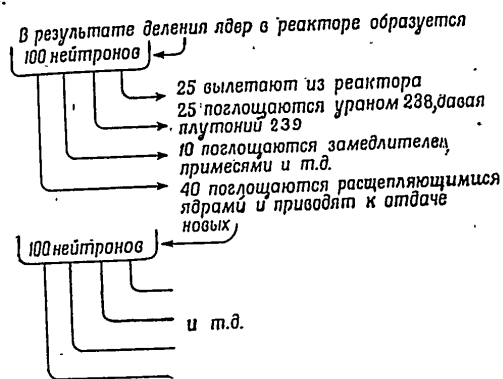


Рис. 51. Схема расхода свободных нейтронов

Таким образом, в реакторе, с одной стороны, непрерывно образуется плутоний 239, а с другой стороны, он непрерывно расходуется. В результате этого в урановых брусках спустя некоторое время после начала работы реактора устанавливается стационарное состояние в отношении количества плутония 239, то есть его количество некоторое время остается постоянным и, судя по литературным данным, достигает 0,6%.

В зависимости от конструкции реакторы могут быть непрерывно действующими или периодическими. В первом случае брусок урана, продержав в реакторе некоторое время, судя по литератур-

ным данным, около 100 дней, заменяют свежим брусом, и так в порядке очереди заменяют последовательно все бруски.

Когда периодические реакторы проработают некоторое время, их «останавливают» и разбирают. Бруски урана подвергают химической обработке, заключающейся в растворении в азотной кислоте с последующим выделением плутония. Последний содержится в бруске, как уже упоминалось выше, при нормальной работе реактора в количестве 0,6%. Таким образом, для получения 10 кг плутония 239 надо переработать около 2 т природного урана, выдержанного в реакторе соответствующее время.

Итак, основная цель работы реактора состоит в образовании в природном уране плутония, предназначенного для использования в качестве делящегося материала.

Каковы же процессы, сопровождающие работу атомного реактора? Прежде всего, по мере развития цепной реакции деления изотопа урана 235 в бруске урана, заложенного в реактор, постепенно накапливаются «осколки» деления атомов урана 235. Примерное количество в граммах «осколков» равно числу граммов изотопа уран 235, вступивших в ядерную реакцию деления. Выше была дана краткая характеристика деления. Выше «осколков», являющихся атомами элементов с порядковыми номерами примерно от № 30 (Zn) до № 62 (Sm). Эти «осколки», скапливаясь в бруске урана, начинают по мере увеличения их количества мешать развитию цепной реакции, поглощая нейтроны. При большом накоплении «осколков» они могут вызвать затухание цепной реакции, и в этом случае реактор прекратит свою работу, то есть в нем прекратится цепная реакция деле-

ния, а следовательно, и образование плутония. Как говорилось выше, «осколки» от деления атомов урана 235 из-за избыточного числа нейтронов в их атомных ядрах испытывают β^- -распад, в ряде случаев сопровождаемый гамма-фотоном. Кроме того, β^- -распад испытывают ядра U^{239} и Np^{239} , образующиеся как промежуточные продукты из урана 238. Таким образом, внутри реактора возникают бета-лучи. Поглощение нейтрона ядром атома урана 238 сопровождается выделением гамма-фотона, и, как указывалось выше, процесс деления и β^- -распад «осколков» также сопровождаются гамма-лучами; поэтому атомный реактор излучает интенсивный поток бета-лучей и интенсивную гамма-радиацию.

По мере развития цепной реакции в атомном реакторе, при нормальной его работе, количество нейтронов непрерывно увеличивается, что вызывает повышение мощности реактора. Для регулирования работы реактора часть нейтронов уводят из реактора с помощью специальных стержней — регуляторов, поглощающих нейтроны. Таким образом, атомный реактор является необычайно мощным источником свободных нейтронов, которые в значительном количестве излучаются реактором, точнее нейтроны выходят из реактора сквозь его поверхность. Общая схема реактора и результатов его работы представлена на рис. 52. Излучение реактором гамма-лучей и нейтронов обуславливает возникновение в воздухе, окружающем реактор, значительного количества ионов. Кроме того, возникшие в реакторе в качестве «осколков» радиоактивные изотопы ксенона и криптона (инертных газов) просачиваются из реакторов в воздух, заражая его радиоактивными газами и радиоактивной пылью (продуктами рас-

пада этих радиоактивных изотопов). Все сказанное вызывает необходимость тщательного ограждения реактора для защиты обслуживающего реактор персонала.

Реактор для защиты людей от излучаемых им гамма-лучей и нейтронов окружается толстой бетонной стеной (по некоторым данным иностранной

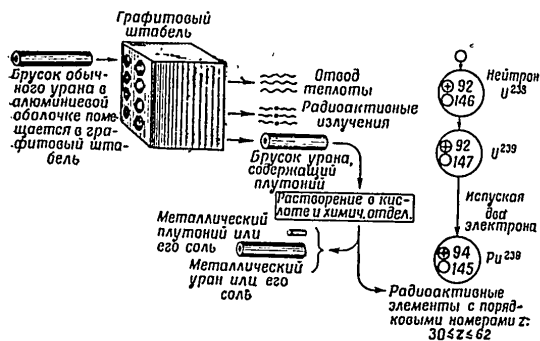


Рис. 52. Схема атомного реактора

печати, до 5 м толщиной), сделанной из специального барьерного цемента. Обычный цемент содержит в качестве необходимой составной части химический элемент кальций. Однако из-за малого порядкового номера его ($Z=20$) и малого порядкового номера других элементов, входящих в обычный цемент ($Si-Z=14$; $O-Z=8$) поглощательная способность этого цемента относительно гамма-лучей невелика. Поэтому цемент, предназначенный для бетона вокруг реактора, готовят так, что вместо кальция в нем содержится

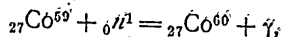
в качестве заменителя барий, имеющий порядковый номер сравнительно большой ($Z=56$).

Развитие цепной реакции состоит в делении атомных ядер урана 235 и образовании двух «осколков» от каждого разделившегося ядра. «Осколки», разлетаясь в противоположные направления с громадными скоростями, сталкиваются с атомами урана, передают им свою кинетическую энергию, и, таким образом, их первоначальная энергия распределяется по всему бруску урана. Это распределение энергии прежде всего скажется в усиленном тепловом движении всех атомов бруска урана. Это усиленное тепловое движение будет обнаружено в виде повышенной температуры всего реактора. С тем чтобы температура не повышалась выше положенного значения, реактор охлаждают путем пропускания через трубы, окружающие уран, охлаждающих веществ. В качестве охладителей в литературе указываются: вода, газообразный гелий, двуокись углерода, жидкие натрий, свинец, сплав калий — натрий.

По некоторым данным, температура у нормально работающего атомного реактора может иметь значение около 600° , поэтому возникло предложение об использовании жидких металлов: натрия (точка плавления $97,5^\circ$), свинца (точка плавления $327,4^\circ$), висмута (точка плавления 271°) в качестве охлаждающих веществ.

Атомный реактор как мощный источник свободных нейтронов используется для приготовления многих радиоактивных изотопов, образующихся при облучении медленными нейтронами устойчивых изотопов. Так, например, природный кобальт состоит из одного изотопа Co^{59} . Если кусок природного кобальта или его соединения, например,

хлористый кобальт внести в соответствующий канал внутри реактора, то этот кусок будет подвергаться мощному облучению медленными нейтронами, и тогда осуществится процесс поглощения ядрами атомов кобальта этих нейтронов, то есть осуществится ядерная реакция, которую можно записать уравнением



в котором буквой γ обозначен фотон, испускаемый ядром атома кобальта при поглощении им нейтрона.

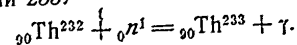
Итак, подытоживая, можно сказать, что атомный реактор, предназначенный для получения плутония 239, является мощным источником гамма-излучения, свободных нейтронов, теплоты, могущей быть использованной для получения электрической энергии, и образующихся радиоактивных изотопов как «осколков» деления атомных ядер урана 235.

Отмеченная выше особенность атомного реактора — быть мощным источником свободных нейтронов — нашла применение для получения изотопа — урана 233 (U^{233}), могущего быть использованным наравне с изотопами U^{235} и Pu^{239} в качестве делящегося материала.

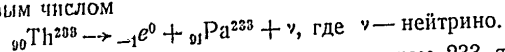
Химический метод отделения плутония 239 от урана представляет собой сложную совокупность операций, обусловленную близостью химических свойств урана и плутония. Выделение плутония из бруска урана, пробывшего некоторое время в реакторе, требует затраты многих усилий и средств и сопряжено со значительными трудностями из-за наличия в бруске «осколков» деления с интенсивной радиоактивностью. Поэтому совершенно естественно, были сделаны усиленные

поиски и других делящихся материалов, получение которых еще проще, чем получение плутония из урана. Такие поиски увенчались успехом, когда был найден способ получения изотопа урана с массовым числом 233. Этот изотоп в отношении деления подобен изотопам — урану 235 и плутонию 239.

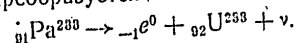
Изотоп U^{233} сравнительно устойчив, он испытывает альфа-распад с периодом полураспада 162 000 лет. Получение этого изотопа осуществляют помещением тория или химического соединения тория в специальные каналы в атомном реакторе. Природный торий состоит из одного изотопа — торий 232 (${}_{90}\text{Th}^{232}$); этот изотоп испытывает альфа-распад с периодом полураспада $1,389 \cdot 10^{10}$ лет (около 14 млрд. лет). При помещении тория внутрь реактора торий подвергается облучению медленными нейтронами, которые он поглощает с образованием изотопа тория — торий 233:



Возникший изотоп тория с массовым числом 233 является β^- -активным с периодом полураспада 23,5 мин., и в результате этого распада из него получается изотоп протактиния с тем же массовым числом



где ν — нейтрино. Изотоп протактиния с массовым числом 233 является также радиоактивным. Испытывая β^- -распад с периодом полураспада 23 дня, протактиний при этом преобразуется в изотоп — уран 233.



Таким образом, в куске тория, облучаемого нейтронами, возникает в результате поглощения

торием, нейтронами и последовательными двумя β^- -распадами изотоп урана, именно — уран 233. Поскольку химические свойства тория и урана весьма различны, то не представляет особого труда химическое отделение изотопа урана от основной массы оставшегося неизменным тория. Единственная трудность, возникающая при выделении изотопа U^{233} , состоит в отделении от него протактиния Pa^{233} , однако и эта трудность невелика, ибо изотоп Pa^{233} может содержаться в очень малых количествах, да и, возможно, он вовсе не мешает основному изотопу — урану 233, если даже он будет присутствовать в качестве небольшой примеси. Следовательно, получение изотопа уран 233 не представляет принципиальных затруднений при наличии нормально работающего атомного реактора. Более того, брусок тория с включенным в него ураном 233, может служить в качестве основного материала для устройства ториевого атомного реактора. Простота отделения урана 233 от тория позволяет сравнительно просто получать делящийся материал.

Поэтому становится понятной фраза, приводимая часто в зарубежной журнальной литературе: «Торий — атомное топливо будущего».

19. САМОВОСПРОИЗВОДЯЩИЙ (БРИДЕРНЫЙ) И СИЛОВОЙ АТОМНЫЕ РЕАКТОРЫ

В результате анализа работы атомных реакторов, предназначенных для производства плутония, возникла мысль о разработке такого реактора, в котором количество расщепляющегося материала увеличивается с течением времени. Если допустить существование такого реактора,

206

в котором на каждый расщепившийся атом урана 235 в среднем образуется 1,5 атома плутония 239, то в результате работы такого реактора в нем при полном использовании урана 235 в каждом килограмме урана возникнет около 10 г плутония 239; далее, если учесть, что плутоний 239 сам может включиться в ядерную реакцию деления, то его количество по мере работы реактора будет возрастать.

Однако такой реактор не может работать сколько угодно длительное время из-за накопления в нем «осколков» деления, которые могут захватывать медленные нейтроны, поэтому бруски урана в таком реакторе должны заменяться свежими брусками природного урана. Такие атомные реакторы, в которых увеличивается количество расщепляемого материала, называют самовоспроизводящими (бридерными). Конструкции самовоспроизводящих реакторов не отличаются по принципу действия от обычных реакторов; в них можно применять материалы (графит, уран, охладители, каркас) особой чистоты и им придана такая форма, при которой достигается наименьшая потеря нейтронов рассеиванием из реактора и наименьшее поглощение их вспомогательными материалами. Однако ко всему сказанному надо добавить, что в самовоспроизводящих реакторах, наряду с природным ураном, возможно, используются бруски урана, обогащенные изотопом U^{235} или Pu^{239} , а также применяются специальные системы распределения брусков, или, например, раствор изотопа U^{233} в жидком висмуте.

Значительное выделение энергии в форме теплоты дало повод к разработке атомных реакторов, предназначенных быть источником энергии. Принцип использования атомного реактора в ка-

207

честве источника энергии заключается в отведении от него теплоты с помощью того или иного охладителя и в применении этой теплоты для решения тех или иных практических задач. Так на рис. 53¹ дана схема использования реактора (штабеля) для нагревания воды и применения

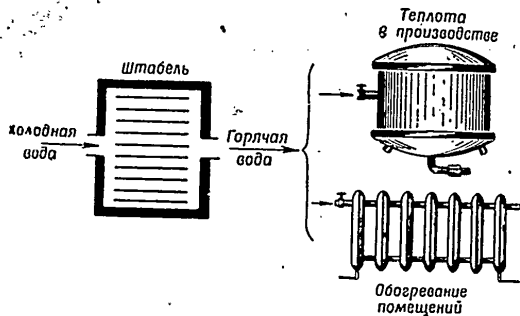


Рис. 53. Схема атомного реактора как источника теплоты для получения горячей воды

горячей воды в производстве. На рис. 54 изображена схема образования пара в реакторе (штабеле) и его использование в производстве для получения механической энергии с помощью турбины и преобразования этой энергии генератором в электрическую энергию, которую можно передавать потребителям. На рис. 55 изображена схема нагревания воздуха и применения его для раз-

¹ Представленные на рис. 53, 54, 55 схемы использования теплоты, выделяющейся в реакторе с помощью охладителей: воды, пара, воздуха, не предполагают непосредственное их использование по назначению.

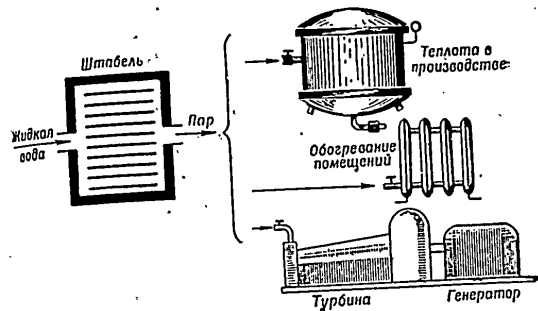


Рис. 54. Схема атомного реактора как источника теплоты для получения перегретого водяного пара

личных целей. Аналогичная лишь более детализированная схема, предполагающая использование специального переносчика теплоты, дана на рис. 56. Во всех этих случаях атомный реактор рассматривался как источник теплоты.

В американской литературе весьма пессимистически относились к вопросу о рентабельности ис-

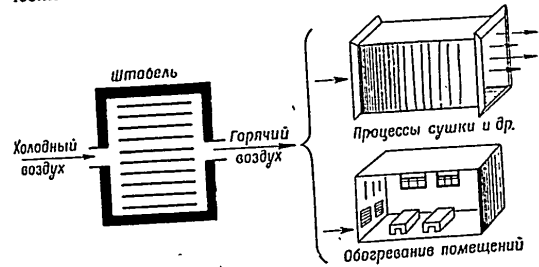


Рис. 55. Схема атомного реактора как источника теплоты для получения горячего воздуха

пользования атомного реактора в качестве источника энергии в мирных целях. В ряде случаев приводилось много доводов против возможности реализации энергии, выделяемой реактором в процессе его работы. Прежде всего подсчитывалась экономическая рентабельность энергии, полученной от атомного реактора и от гидростанции или парового котла. Не во всех случаях эти подсчеты были в пользу атомного реактора.

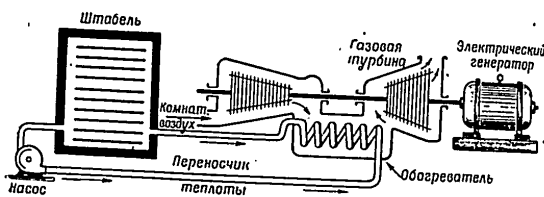


Рис. 56. Схема атомного реактора как источника теплоты для газовых турбин

Другие доводы против возможности реализации энергии, выделяемой атомным реактором, состояли в предсказании 1) трудности подбора охладителя, материалов (каркас) реактора, могущих выдержать действие радиоактивных излучений и противостоять коррозии и прежде всего невидоизменяющихся под действием медленных нейтронов; 2) трудности защиты от радиоактивных излучений, ионизации воздуха, загрязнения его радиоактивными газами и пылью и т. д. Действительно, охладитель, пройдя сквозь атомный реактор, может загрязниться радиоактивными «осколками» или стать радиоактивным, поглотив некоторое количество нейтронов, и в этом случае

он должен быть изолирован от обслуживающего персонала тщательным его экранированием. Одним словом, практическое использование атомного реактора в качестве источника энергии наталкивается главным образом на трудности обеспечения безопасности обслуживающего персонала.

В капиталистических странах использование атомной энергии в мирных целях встречает серьезные препятствия, так как грозит обесценить капиталы, вложенные в промышленность. Об этом наиболее откровенно заявили в сенате США сенаторы Ванденберг и Макмагон. «Предположим,— говорили они,— что кто-либо из нас объявит о своем изобретении локомотива с атомным двигателем, который за время пробега между Нью-Йорком и Вашингтоном поглощал бы всего на несколько долларов атомной энергии. В результате акции всех железнодорожных и угольных компаний обесценились бы, страховые компании, связанные с капиталовложениями железных дорог, обанкротились бы, и все это привело бы к общему финансовому хаосу». Только советская экономика и наука свободны от корыстолюбия капиталистов. В нашей стране открываются безграничные перспективы использования атомной энергии в мирных целях. Своими исследованиями советские ученые стараются поставить атомную энергию на службу народу во имя мира и прогресса.

Сообщение Советского правительства о пуске в 1954 году электростанции на 5000 квт, работающей на атомном топливе, и строительстве других станций с большей мощностью показало реальную возможность использования ядерной энергии для промышленных целей. Это сообщение живо комментировалось зарубежными газетами как со-

бытие огромной важности, открывающее новую эпоху в проблеме использования атомной энергии. Советская электростанция на атомном топливе (рис. 57) представляет собой атомный реактор с графитовым замедлителем и водяным охлаждением, работающий как мощный источник энергии в виде теплоты. Несомненно, опыт работы этой станции открыл новые перспективы и наметил новые пути практического использования ядерной энергии. Таким образом, длительная работа советской электростанции на атомном топливе, первой, использовавшей ядерную энергию с практической целью, является поворотным пунктом истории использования ядерной энергии для мирных целей.

Работа атомного реактора может осуществляться в том случае, если его масса превышает некоторую критическую величину. Исследования показали, что величина критической массы атомного реактора уменьшается с увеличением концентрации расщепляющегося материала в урановых брусках. Оказывается, если уран обогащать изотопами — уран 235 или плутонием 239, то критическая масса уменьшается, как это схематически изображено на рис. 58, и при содержании изотопа уран 235 в урановых брусках в количестве 15% позволяет осуществлять цепную реакцию деления в атомных реакторах весьма малых размеров.

Таким образом, атомный реактор может быть весьма малых размеров, если в него входят урановые бруски, обогащенные ураном 235 или плутонием 239, и это обстоятельство — малые размеры реактора — обуславливает собой небольшие размеры экранов и защитных стенок, защищающих обслуживающий персонал, от вред-

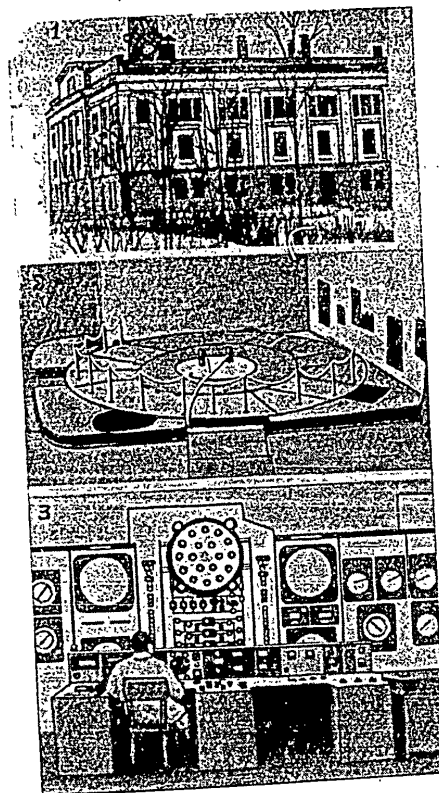


Рис. 57. Первая атомная электростанция Советского Союза:

1 — здание электростанции; 2 — вид атомного котла (реактора); он имеет небольшие размеры. Атомный котел расположен за мощной бетонной защитой, предохраняющей персонал станции от воздействия радиоактивного излучения; 3 — центральная часть общего пульта управления, с которого производится управление атомным котлом и всеми другими агрегатами станции

ных излучений, исходящих из реактора. Все это дало повод к разработке проекта использования атомных реакторов с ураном, обогащенным изотопом урана 235 или плутонием 239, в качестве источника энергии для двигателей в подводной лодке. Какие преимущества дает атомный реактор для действия подводной лодки? Это прежде всего отсутствие газовых продуктов сгорания и огромный радиус действия, ибо подводной лодке не бу-

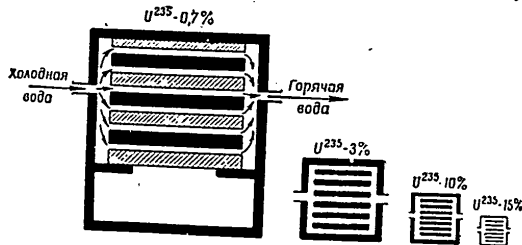


Рис. 58. Схема изменения размеров атомного реактора в связи с изменением содержания в уране расщепляющегося изотопа

дет нужды возобновлять запасы топлива. Постройка таких подводных лодок позволит решать военные задачи, которые недоступны для обычных подводных лодок. Для больших кораблей будет целесообразным применение атомного реактора в качестве источника энергии, работающего с небогащенным ураном. Представляется весьма возможным использование урана, обогащенного изотопом урана 235 или плутонием 239, в качестве источника энергии для двигателей самолетов и для ракетных двигателей. Согласно данным зарубежной печати, в США построены подводные лодки

«Наутилус» и «Морской волк», которые прошли испытания длительного подводного плавания.

20. О ТЕРМОЯДЕРНЫХ РЕАКЦИЯХ И ВОДОРОДНОЙ БОМБЕ

При рассмотрении путей практического использования ядерной энергии указывалось, что один из путей состоит в соединении легких атомных ядер, то есть образовании тяжелых ядер из более легких. Этот путь прежде всего обращает на себя внимание тем, что слиянию ядер мешают кулоновские силы отталкивания, коль скоро атомные ядра несут одинаковый по знаку электрический заряд. Очевидно, слияние ядер возможно лишь как результат проявления ядерных сил, которые действуют на расстояниях очень малых, не больших диаметра ядра атома. Поэтому чтобы два ядра могли слиться в одно, необходимо привести их в соприкосновение, а для этого надо преодолеть силы электрического отталкивания. Это возможно лишь в том случае, если оба ядра движутся навстречу друг другу с громадными скоростями, то есть если они имеют огромную кинетическую энергию, чтобы за счет этой энергии они смогли преодолеть отталкивательные электрические силы. Как известно, наличие у атомов какого-либо газа больших кинетических энергий свидетельствует о высокой температуре газа и чем выше последняя, тем больше кинетическая энергия атома (или молекулы). Расчеты показывают, что атомные ядра в газе, имеющем температуру в несколько миллионов градусов, имеют очень большую кинетическую энергию и поэтому небольшая часть их, обладающая особенно большой энергией, способна в результате столкновения слиться друг с другом.

В процессе образования одного ядра из двух легких ядер должна выделиться энергия или в форме фотонов, или в виде кинетической энергии; в последнем случае возникшая дополнительно кинетическая энергия в результате столкновения атомных ядер распределится между атомами газа и температура газа еще повысится. Это приведет к ускорению слияния новых ядер, и процесс слияния будет развиваться ускоренно, что приведет в конце концов к взрыву. Вот такие процессы образования одних атомных ядер из других, например более тяжелых из легких, вызванные высокой температурой, и называются термоядерными реакциями.

Прежде всего возникает вопрос, происходят ли на Земле в природных условиях термоядерные реакции? Очевидно нет, так как на поверхности Земли и внутри Земли нет областей со столь высокой температурой, которая необходима для развития термоядерной реакции. Если же обратиться к звездам, то внутри них, оказывается, температура очень высокая, что позволяет сделать предположение о возможности развития в них термоядерных реакций. Обозначив массу и радиус Солнца через M_0 и R_0 , можно составить таблицу свойств некоторых звезд, обозначив через M и R массу и радиус звезды.

Звезда	M/M_0	R/R_0	Давление в центре звезды в атм.	Плотность в центре звезды	Температура абсолютная в центре звезды	Средняя температура
Солнце	1	1,0	$1 \cdot 10^{11}$	76	$19 \cdot 10^6$	35
Сирнус	2,4	1,7	$1 \cdot 10^{11}$	41	$26 \cdot 10^6$	35
Капелла	4,2	13	$8 \cdot 10^7$	0,16	$6 \cdot 10^6$	35
γ Лебедя	17	5,9	$3 \cdot 10^{10}$	6,5	$32 \cdot 10^6$	80

216

Таблица показывает, что внутри звезд господствуют огромные температуры; так, внутри Солнца температура равна девятнадцати миллионам градусов ($19 \cdot 10^6$); следует, кстати, иметь в виду, что на поверхности Солнца, в газовом облаке, окутывающем его, температура равна 6000° . Люди давно пытались объяснить, почему Солнце, излучая огромные количества энергии, не успело охладиться, ведь оно излучает каждую секунду $9 \cdot 10^{25}$ кал. или в одну минуту $250 \cdot 10^6$ т энергии (двести пятьдесят миллионов тонн). Если бы внутри Солнца не выделялась энергия и не покрывала собой расход на излучение, то Солнце давно охладилось бы. Однако наблюдения показали, что во всяком случае на протяжении последних 3000 лет оно не изменило заметно своей излучательной способности. Из всей излученной Солнцем энергии на Землю попадает всего лишь две миллиардные доли, и этой малой доли оказывается достаточно, чтобы обеспечить рост растений, течение рек, переносы огромных количеств воды и воздуха и т. д. Человечество, сжигая каменный уголь, нефть, бензин, в сущности освобождает ту энергию, которую когда-то Солнце излучило и которая была усвоена Землей и в конечном счете оказалась связанной с древесной растительностью.

Многие прежние попытки объяснить источник энергии, покрывающий собой расход энергии Солнцем на излучение, оказались неудовлетворительными. Лишь в последние 20 лет было найдено объяснение происхождения солнечной энергии в виде признания течения на Солнце термоядерной реакции превращения водорода в гелий, процесса, не осуществляющегося в природных земных условиях.

217

В настоящее время общепризнано, что лучшая энергия Солнца освобождается в результате термоядерных реакций, протекающих в недрах Солнца с участием углерода (так называемый углеродный цикл). Углерод в конце реакции снова восстанавливается и является как бы катализатором процесса, четыре же атома водорода объединяются в ядро атома гелия. Энергетический эффект этой термоядерной реакции, как уже отмечалось, колоссален. В центре Солнца температура достигает 19 млн. градусов, а плотность вещества в 76 раз больше плотности воды (это отвечает давлению в миллиарды атмосфер). В этих условиях реакции по образованию гелия протекают с большой интенсивностью. Они то и являются источником той колоссальной энергии, которая излучается солнцем в течение миллиардов лет.

Ежесекундно на Солнце 564 млн. т водорода превращаются в 560 млн. т гелия, при этом потеря массы Солнца составляет 4 млн. т. Следовательно, вчера Солнце весило почти на 360 млрд. т больше, чем сегодня. Не надо, однако, опасаться, что Солнце скоро ослабит «деятельность» при подобном расходе своих запасов. Масса Солнца столь велика, что при упомянутой интенсивности излучения в течение 15 млрд. лет Солнце потеряет всего лишь около 0,001 своей массы.

И на звездах протекают ядерные процессы. Однако в некоторых случаях освобождение и выделение ядерной энергии происходит иначе, чем на Солнце. Иногда в глубинах звезды накапливаются запасы выделившейся энергии и затем через определенные промежутки времени постепенно освобождаются. Это приводит к пульсации выделения ядерной энергии, и звезда представ-

218

ляется нам как переменная, то есть с периодически изменяющейся яркостью.

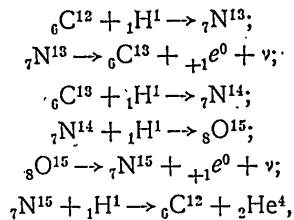
Если накопление энергии происходит в больших количествах, но на небольших глубинах, освобождение ядерной энергии проявляется уже в виде взрыва. В результате этого оболочка звезды отделяется и рассеивается в окружающем пространстве. При подобной вспышке звезды, именуемой в таком случае «новой», выделяется такое количество энергии, которое наше Солнце излучает в течение 10—100 тысяч лет. После взрыва звезда снова погружается в первичное состояние накопления энергии до нового взрыва. Подобные явления в нашей галактике происходят один — два раза в год. Еще более гигантской получается катастрофа при накоплении энергии в центре звезды. В этом случае при взрыве выделяется еще большее количество энергии. Взрыв отмечается как вспышка так называемой «сверхновой» звезды. Энергия, выделяемая в течение нескольких дней при взрыве «сверхновой» звезды, равняется энергии, выделяемой Солнцем в течение 1 млрд. лет. Вспышки «сверхновых» звезд происходят очень редко.

При многих астрофизических исследованиях было установлено, что звезды главным образом состоят из водорода и гелия, причем в старых звездах преобладает гелий, а в молодых — водород. Солнце состоит примерно на 35% из водорода.

Детальное исследование показало, что это превращение водорода в гелий осуществляется рядом последовательных процессов. Теория этого превращения основывается на представлении о своеобразном цепном «механизме», в котором имеющиеся на Солнце атомы углерода играют роль катализаторов — веществ, способствующих

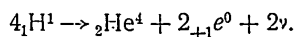
219

течению реакции, но не расходующихся по мере ее течения. Указанную последовательность ядерных процессов можно записать следующими уравнениями:



здесь ${}_{+1}e^0$ обозначает позитрон, то есть положительный электрон, а ν обозначает нейтрино.

Сопоставляя эти уравнения, видим, что вначале из изотопа углерода ${}_6\text{C}^{12}$ образуется изотоп азота ${}_7\text{N}^{13}$. Этот последний превращается в изотоп ${}_6\text{C}^{13}$ и затем в ${}_7\text{N}^{14}$. Изотоп азота ${}_7\text{N}^{14}$ в условиях высокой солнечной температуры вступает в ядерную реакцию с протоном (ядром атома водорода), образуя изотоп кислорода ${}_8\text{O}^{15}$ и т. д. Вся цепь последовательных превращений заканчивается образованием гелия ${}_2\text{He}^4$ и исходного изотопа углерода ${}_6\text{C}^{12}$. Как легко видеть, вся эта цепь превращений сводится к превращению водорода в гелий и два позитрона



Если иметь в виду, с одной стороны, массу атома водорода 1,008131 и массу атома гелия 4,00386, а с другой стороны, то, что в массу четырех атомов водорода включены массы четырех электронов и в массу атома гелия — массы двух электронов, то энергетический эффект превраще-

ния водорода в гелий можно оценить по уменьшению массы.

Для оценки этого уменьшения учтем массу позитронов; поскольку масса позитрона равна массе электрона, то она равна 0,000548. Если обозначить массы атома водорода, атома гелия, электрона и позитрона соответственно через m_{H} , m_{He} , m_{e-} и m_{e+} , то уменьшение массы можно представить в виде соотношения

$$4(m_{\text{H}} - m_{e-}) - \{(m_{\text{He}} - 2m_{e-}) + 2m_{e+}\}.$$

Так как $m_{e-} = m_{e+}$, то уменьшение массы равно $4m_{\text{H}} - 4m_{e-} - m_{\text{He}}$. Следовательно, можно написать $4 \cdot 1,00813 - 4,00386 - 4 \cdot 0,00055 = 0,02646$.

Выражая уменьшение массы в мегаэлектронвольтах, надо полученную величину 0,02646 умножить на переводный множитель 931, поскольку единица атомной массы эквивалентна 931 Мэв: $0,02646 \cdot 931 = 24,6$ Мэв. В калориях эта величина, отнесенная к грамм-атому гелия (т. е. к четырем граммам), равна: $24,6 \cdot 3,83 \cdot 10^{-14} \cdot 6,02 \cdot 10^{23} = 5,67 \cdot 10^{11}$ кал, то есть 567 млрд. кал.

Таким образом, образование четырех граммов гелия из водорода освобождает (то есть превращает в кинетическую энергию атомных ядер) огромное количество энергии. Следовательно, источником энергии Солнца служит образование гелия из водорода, сопровождающееся выделением энергии.

Это и есть тот источник энергии, который покрывает собой расход энергии, излучаемой Солнцем в мировое пространство. Если бы удалось осуществить это превращение водорода в гелий в большом масштабе, в земных условиях, то человечество получило бы почти неиссякаемый источник энергии.

точник энергии, поскольку водорода на Земле, например в воде, чрезвычайно много.

Элементарный подсчет показывает, что превращение одного килограмма водорода в гелий обусловит собой выделение такого количества энергии, которое получается при сгорании двадцати одной тысячи ($21 \cdot 10^3$) тонн угля. Однако осуществление этого процесса на Земле наталкивается пока на большие трудности, даже в том случае, если будет обеспечена высокая температура в несколько миллионов градусов.

Пример превращения наиболее легкого изотопа водорода в гелий побудил исследователей изучить возможности течения и других ядерных реакций с другими изотопами водорода. Так оказалось возможным осуществление ряда процессов, данные о которых сведены на стр. 223 в таблицу.

Детальное изучение ядерной D—T реакции показало, что наименьшая температура, при которой возможно ее течение не в форме единичного акта, а в большом масштабе оценивается величиной в несколько миллионов градусов. Поскольку каждая из ядерных реакций (уравнения которых приведены выше в таблице) при своем течении выделяет огромное количество энергии, что влечет за собой необычайно высокое повышение температуры и мгновенное резкое увеличение давления, то как следствие этих двух факторов течение ядерной реакции может вызвать взрыв исключительной большой силы. Однако, как показывают данные второго столбца, есть основания думать, что взрывной характер могут иметь лишь реакции D—D, D—T и T—T, остальные из-за медленности их течения даже в солнечных условиях не могут привести к взрыву.

Ядерная реакция	Промежуток времени течения реакции в солнечных условиях	Название реакции	Энергетический эффект		Количество угля в тоннах, при сгорании которого выделится столько же энергии
			в Мэв	в ккал на 1 кг ископаемой смеси	
$4\text{H}^1 = \text{He}^4 + 2\text{e}^0 + 2\gamma$	—	H—H	24,6	$146 \cdot 10^6$	$21 \cdot 10^3$
$1\text{H}^1 + 1\text{H}^1 = 1\text{H}^2 + 1\text{e}^0 + \gamma$	—	H—H	1,42	—	—
$1\text{H}^2 + 1\text{H}^2 = 2\text{He}^4$	—	D—D	22	$126,5 \cdot 10^6$	$18,2 \cdot 10^3$
$1\text{H}^1 + 1\text{H}^2 = 2\text{He}^3$	0,5 сек.	H—D	5,5	$42,13 \cdot 10^6$	$6 \cdot 10^3$
$1\text{H}^2 + 1\text{H}^2 = 1\text{H}^3 + 1\text{H}^1$	$3 \cdot 10^{-6}$ сек.	D—D	4	$23 \cdot 10^6$	$3,3 \cdot 10^3$
$1\text{H}^2 + 1\text{H}^2 = 2\text{He}^3 + \sigma^1$	$3 \cdot 10^{-6}$ сек.	D—D	3,26	$18,75 \cdot 10^6$	$2,68 \cdot 10^3$
$1\text{H}^1 + 1\text{H}^3 = 2\text{He}^4$	$5 \cdot 10^{-2}$ сек.	H—T	19,6	$112,7 \cdot 10^6$	$16,2 \cdot 10^3$
$1\text{H}^2 + 1\text{H}^3 = 2\text{He}^4 + \sigma^1$	$1,2 \cdot 10^{-6}$ сек.	D—T	17,6	$81 \cdot 10^6$	$11,6 \cdot 10^3$
$1\text{H}^3 + 1\text{H}^3 = 2\text{He}^4 + 2\sigma^1$	10^{-8} сек.	T—T	11,55	$43,4 \cdot 10^6$	$6,2 \cdot 10^3$

Таким образом, для осуществления взрыва смеси, например дейтерия и трития (тяжелого и сверхтяжелого изотопов водорода), необходима очень высокая начальная температура смеси. На основании всего сказанного становится ясным принцип действия водородной бомбы. В смесь, например трития и дейтерия, вносится источник, выделяющий большое количество энергии и могущий развить температуру в несколько миллионов градусов, хотя бы в некоторой части смеси. Тогда в этой части смеси начнется термоядерная реакция, в результате быстрого течения которой выделится огромное количество энергии, быстро повысится температура вблизи лежащих слоев исходной смеси, в них осуществится течение реакции и так от слоя к слою почти мгновенно распространится высокая температура и в смеси протечет термоядерная реакция.

Таким образом, термоядерная реакция, начавшись в одной части исходной смеси, выделяет огромное количество энергии, резко повышает температуру. В реакцию включаются все большие количества смеси; течение ядерной реакции будет происходить почти во всем объеме смеси, и осуществится взрыв исключительно большой силы.

Имея в виду выделение огромного количества энергии и необычайно быстрое повышение температуры, можно с уверенностью сказать, что для завершения реакции понадобится миллионные доли секунды. Из сказанного очевидно, что взрыв, например смеси трития и дейтерия, может быть осуществлен с большим количеством смеси, и тем самым взрыв может измеряться тротиловым эквивалентом в миллионы и даже десятки миллионов тонн.

В сущности взрыв водородной бомбы и есть

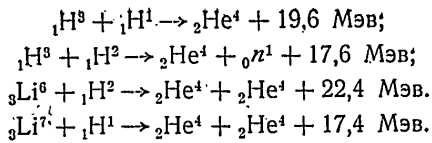
осуществление одной из приведенных выше термоядерных реакций, например смеси трития и дейтерия (смеси сверхтяжелого ${}^3\text{H}$ и тяжелого ${}^2\text{H}$ водорода).

Таким образом, принцип возникновения взрыва водородной бомбы, т. е. механизм ядерной реакции, совершенно иной, чем в случае взрыва атомной бомбы. Сила взрыва водородной бомбы может быть значительно больше атомной путем увеличения количества взрывчатой смеси, что не может быть сделано для атомной бомбы.

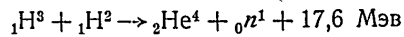
Сила взрыва атомной бомбы из-за принципа ее действия не может быть увеличена путем увеличения количества взрывчатого элемента выше некоторого предела, определяемого критической массой элемента и формой куска в виде которого он находится.

Сущность действия водородной бомбы основана, как об этом говорилось выше, на необходимости начального местного повышения температуры исходной массы до нескольких миллионов градусов. Это повышение температуры может быть осуществлено специальным источником энергии, действие которого основано на цепной реакции деления атомных ядер делящегося материала, например плутония 239. Возможно, что этим источником является прибор, аналогичный атомной бомбе. Таким образом, есть основание считать, что взрыву водородной бомбы должно предшествовать в ней явление, аналогичное взрыву атомной бомбы. Принципиальная схема водородной бомбы представлена на рис. 59.

По данным иностранной печати, недостаточно все же достоверным, ядерной реакцией в водородной бомбе является один из следующих процессов:



Однако частое упоминание в печати об ядерной реакции трития и дейтерия



дает основание считать ее наиболее вероятной для осуществления взрыва водородной бомбы;

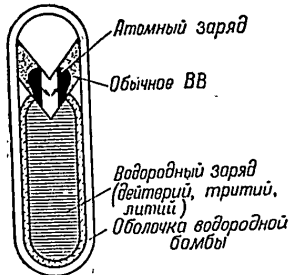
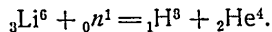
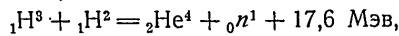


Рис. 59. Принципиальная схема водородной бомбы

к тому же есть данные, что производство трития осуществляется путем облучения лития нейтронами



Если остановиться на схеме действия водородной бомбы, основанной на термоядерной реакции



то возникает вопрос о форме нахождения трития (${}_1\text{H}^3$ или Т) и дейтерия (${}_1\text{H}^2$ или D) в водород-

ной бомбе. Весьма возможно, что оба эти изотопа вводятся в водородную бомбу в виде соединений с литием LiT и LiD, являющихся при обыкновенной температуре веществами твердыми с малым удельным весом. Согласно данным американской печати, к которым следует относиться весьма критически, водородная бомба большой разрушительной силы в форме сигары может иметь длину в несколько метров, диаметр 4,5 фута (1,4 м), вес 21 т.

О действии водородной бомбы дает представление нижеприведенная таблица, заимствованная из американского журнала. Эти данные, видимо, сильно преувеличены, и к ним нужен критический подход, но в целом они подтверждают сделанный выше вывод о большей разрушающей силе водородных бомб по сравнению с атомными.

Тип бомбы	Зона сильного разрушения		Зона среднего разрушения	
	радиус	площадь	радиус	площадь
Атомная бомба (А-бомба, тротиловый эквивалент 20 тыс. т)	1/2 мили (0,8 км)	3/4 кв. мили (2,1 кв. км)	1 миля (1,6 км)	3 кв. мили (8,03 кв. км)
Водородная бомба (H-бомба, в 8 раз мощнее А-бомбы)	1 миля (1,6 км)	3 кв. мили (8,03 кв. км)	2 мили (3,2 км)	12 кв. мили (32,15 кв. км)
Водородная бомба (H-бомба, в 1000 раз мощнее А-бомбы)	5 мили (8 км)	75 кв. мили (191 кв. км)	10 мили (16 км)	300 кв. мили (803,84 кв. км)

Взрыв водородной бомбы сопровождается теми же поражающими факторами, что и атомной, только в больших размерах.

Существенное отличие результатов взрывов водородной бомбы и атомной бомбы состоит в том, что после взрыва атомной бомбы возникают радиоактивные «осколки», образующие радиоактивную пыль; при взрыве водородной бомбы «осколки» возникают только от запала, от прибора, который на базе цепной реакции деления вызывает местное повышение температуры. Если ядерная реакция, лежащая в основе действия водородной бомбы, является взаимодействием трития и дейтерия с образованием гелия и нейтрона, то после взрыва водородной бомбы можно ожидать возникновения мощного потока нейтронов, могущего в различных предметах индуцировать искусственную радиоактивность. Вопросы защиты от последствий взрыва водородной бомбы аналогичны тем, которые ставятся относительно защиты от последствий взрыва атомной бомбы.

В зарубежной печати неоднократно упоминалось о боевых радиоактивных веществах. Этим термином обозначают радиоактивные вещества, в частности, «осколки», образующиеся при делении тяжелых атомных ядер, предполагаемые для использования, например, в форме пыли, против вооруженных сил и населения противника. Среди таких веществ обращает на себя внимание кобальт ($^{27}\text{Co}^{60}$). Радиоактивный кобальт β^- -активен и испускает гамма-излучение. Его период полураспада 5 лет и он сравнительно легко образуется из природного кобальта, при облучении его нейтронами.

Однако применение радиоактивных веществ наталкивается на те затруднения, что испускаемые этими веществами гамма-излучения, обладающие большой проникающей способностью, опасны для обслуживающего персонала. Эти ра-

диоактивные вещества предполагают использовать в снарядах или иным путем для забрасывания к противнику.

В иностранной печати сообщалось о кобальтовой бомбе, которая представляет собой водородную бомбу, в оболочке которой находится много кобальта в виде ли кобальтовой стали или в форме кобальтовых соединений. Образовавшиеся при взрыве водородной бомбы свободные нейтроны в момент развития ядерной реакции или уже в последующее время в газовом облаке будут поглощаться кобальтом, и при этом возникнет радиоактивный кобальт. Таким образом, кобальтовая бомба, вероятно, является водородной бомбой, при взрыве которой образуется очень много радиоактивной пыли, состоящей из «осколков» деления тяжелых атомных ядер и радиоактивного кобальта. Следовательно, при взрыве кобальтовой бомбы возникает радиоактивный кобальт, а до взрыва кобальт в бомбе был не радиоактивным и не представлял опасности для обслуживающего персонала.

В развитии вооруженных сил крупнейших капиталистических государств главное внимание уделяется атомному и термоядерному (водородному) оружию, разработке целой серии его образцов, отличающихся различной взрывной мощностью, а также разработке способов использования атомного и термоядерного оружия авиацией, флотом, артиллерией и реактивными средствами.

Советские Вооруженные Силы также имеют теперь разнообразное атомное и термоядерное оружие, мощное ракетное и реактивное вооружение разных типов, в том числе ракеты дальнего действия.

В соответствии с планом научно-исследовательских и экспериментальных работ в области атомной энергии в нашей стране были проведены испытания новых типов атомного и термоядерного оружия. Эти испытания полностью оправдали соответствующие научно-технические расчеты. Они показали также важные новые достижения советских ученых и инженеров. Опытный взрыв водородной бомбы (в конце 1955 года), сброшенной с самолета, был самым мощным из всех взрывов, проведенных до сих пор. В целях предотвращения радиоактивных воздействий взрыв был произведен на большой высоте. При этом производились широкие исследования по вопросам защиты людей.

Нашим ученым и инженерам удалось при сравнительно небольшом количестве используемых ядерных материалов получить взрыв, сила которого равна силе взрыва многих миллионов тонн обычных взрывчатых веществ, и она может быть значительно усилена.

Советский Союз никому не угрожает и ни на кого не собирается нападать. Но если агрессивные круги, уповая на атомное оружие, решились бы на безумие и захотели испытать силу и мощь Советского Союза, — то можно не сомневаться, что агрессор будет подавлен тем же оружием и что погибнет не «мировая цивилизация», сколько бы она ни пострадала от новой агрессии, а погибнет подгнившая капиталистическая система, которая уже отживает свой век!

Конечно, возникновение третьей мировой войны в современных условиях, когда имеются такие виды оружия, как атомные и водородные бомбы, а также средства их доставки: дальние бомбардировщики и баллистические ракеты, которые

могут доставить указанное оружие в любой пункт земного шара, повело бы к гораздо более тяжелым человеческим жертвам, к несравненно большим материальным потерям, к уничтожению крупнейших городов и промышленных центров, к разрушению целых районов и областей, особенно в странах с высоким промышленным развитием и большой плотностью населения.

Наличие в Советском Союзе атомного и водородного оружия еще более укрепляет его обороноспособность, повышает роль Советского государства в его борьбе за мир во всем мире. Сторонники атомной войны в капиталистических странах должны знать, что в наше время нельзя воевать, не подвергаясь ответным ударам. Если хочешь наносить атомные удары по противнику, то будь готов получить такие же, а может быть, и более мощные удары с его стороны.

За последние годы в наших сухопутных войсках, авиации и флоте проведена большая работа по обучению войск искусству ведения боевых действий в условиях применения атомного оружия и других новых средств борьбы.

Советские Вооруженные Силы способны надежно защищать интересы нашей Родины, чтобы никакая провокация врагов не была для нас неожиданной.

21. АТОМНУЮ ЭНЕРГИЮ НА СЛУЖБУ ЧЕЛОВЕКУ

Мы являемся свидетелями технической революции не менее значительной, чем открытие электричества или изобретение паровой машины. Овладение атомной энергией — яркое свидетельство торжества человека над силами природы. Нет такого известного нам источника энергии,

который был бы таким же неистощимым и могучим, как ядра атомов. Если учесть, что запасы атомной энергии в окружающем нас мире практически неисчерпаемы, становится ясно, какое мощное средство изменения природы получил человек.

Достигнутые в Советском Союзе успехи в развитии ядерной физики, радиохимии, автоматики, телемеханики, электроники и других отраслей науки и техники позволили широко развернуть работы по использованию атомной энергии в мирных целях.

В нашей стране уже накоплен большой опыт в области мирного применения атомной энергии.

В июле 1955 г. в Москве работала сессия Академии наук СССР по вопросам мирного использования ядерной энергии. Эта конференция проходила в форме пленарных заседаний и заседаний в четырех секциях, организованных отделением Академии наук: химических наук, физико-математических наук, технических наук и биологических наук. На этих заседаниях было заслушано много докладов советских ученых по основным вопросам мирного использования ядерной энергии, на которых были подробно обсуждены пути применения ядерной энергии в мирных целях. Международная научно-техническая конференция ученых в Женеве в августе 1955 г. рассмотрела общие направления практического мирного использования ядерной энергии. Каковы же эти направления? Кратко их можно разбить на три больших раздела.

I. Энергетика: 1) атомные электростанции; 2) транспортные установки с ядерным «горючим»: паровозы, пароходы, ледоколы, подводные лодки, самолеты; 3) прямое превращение энер-

232

гии излучения в электрическую: атомные элементы, батареи.

II. Меченые атомы для научного исследования и практического использования: 1) биология и сельское хозяйство; 2) медицина; 3) химия и химическая промышленность; 4) металлургия; 5) автоматика и телемеханика; 6) геологическая разведка и определение возраста пород.

III. Излучение для научного исследования и практических целей: 1) дефектоскопия; 2) медицина; 3) стерилизация; 4) химия и химическая промышленность; 5) геологическая разведка; 6) автоматика и телемеханика; 7) светящиеся составы и т. д.

Владея атомным и термоядерным оружием различных видов, Советский Союз неуклонно выступает за запрещение атомного и термоядерного оружия и мирное использование атомной энергии и непрерывно работает над проблемой практического мирного использования ядерной энергии.

Мы явились свидетелями того, что в Советском Союзе 27 июня 1954 г. начала работать первая в мире электростанция на 5000 квт на ядерном горючем.

Работающая в настоящее время первая атомная электростанция Советского Союза состоит из реактора с графитовым замедлителем и урановыми стержнями общей массой 550 кг. Урановые стержни состоят из урана, обогащенного изотопом U^{235} , которого содержится 5%.

Теплоносителем является дистиллированная вода, которая под большим давлением омывает урановые трубы. Из реактора вода, имеющая температуру 260—270°, поступает в парогенераторы. Каждый парогенератор состоит из

233

подогревателя воды, испарителя воды и пароперегревателя. Проходя через парогенераторы, вода первичного контура отдает теплоту движущейся ей навстречу воде второго контура и превращает ее в пар (три группы пароперегревателей производят в час 40 т. пара при температуре 255—260°). Циркуляционные насосы (при полной мощности станции три работают, один в резерве) обеспечивают расход воды около 300 т в час. Они перекачивают охлажденную воду обратно в реактор. Так заканчивается цикл обращения первичного теплоносителя.

Вода, проходя через реактор, становится радиоактивной. Поэтому все элементы первичного контура окружены специальной защитой, предохраняющей обслуживающий персонал от радиоактивных излучений.

Вторичный теплоноситель (пар) уже не радиоактивен. Образовавшийся пар попадает в турбину, которая приводит в движение электрический генератор мощностью 5000 квт. Отработанный пар охлаждается в конденсаторе, и получающаяся там вода (конденсат) перекачивается насосами в подогреватель парогенератора.

Реактор помещается в герметическом стальном цилиндре. Это позволяет создавать внутри реактора благоприятную атмосферу инертного газа (гелия или азота).

Биологическая защита обслуживающего персонала обеспечивается водяным слоем толщиной 100 см и бетонной стеной толщиной в 3 м. Кроме того, в верхней части реактора защита осуществляется графитовым отражателем, стальной крышкой и чугунной плитой толщиной 250 мм.

Реактор снабжен 22 регулирующими стержнями. Из них четыре стержня поддерживают мощ-

ность реактора на нужном уровне с точностью до 3% и 18 стержней из карбида бора предназначены для компенсации постепенного выгорания U^{235} . Регулирующие стержни подвешены на тросах и перемещаются с помощью электростанции. Автоматическое управление реактором осуществляется механизмом, передвигающим стержни. Этот механизм связан с ионизационными камерами, расположенными вблизи активной зоны реактора. Кроме того, имеются еще два стержня аварийной защиты. При поступлении аварийного сигнала эти стержни падают в активную зону аппарата и прекращают цепной процесс.

При замене рабочего канала его отсоединяют от охлаждающей системы; с помощью крана рабочий канал поднимают и отвозят в специальное хранилище. Управление подъемным краном производится из помещения, защищенного от радиоактивных излучений.

Первая атомная электростанция СССР размещается в трех зданиях. В главном здании находятся ядерный реактор, парогенераторы, насосы и другое оборудование для обслуживания станции и для проведения научных и инженерных исследований. Там же размещается и пульт управления станции. Во втором здании установлены: паровая турбина с электрическим генератором, электрическое распределительное устройство, конденсатор и другое оборудование, относящееся к контуру вторичного теплоносителя (пара). Наконец, в третьем здании размещаются вентиляционные устройства, необходимые для выброса в трубу радиоактивных газов, выделяющихся при работе ядерного реактора.

Ядерный реактор помещается в центральном

зале главного здания. Его верхняя чугунная плита находится на уровне пола, что облегчает обслуживание каналов и их замену: Насосы первичного теплоносителя, поддерживающие в дистиллированной воде необходимое давление, расположены в нижнем этаже. Так как насосы эти перекачивают радиоактивную воду, то они находятся в помещении, защищенном толстыми бетонными стенами. Толстыми стенами окружены также помещения, где находятся парогенераторы, по которым проходит активная вода.

В верхнем этаже, справа от главного входа, размещен главный пульт управления станции. Автоматизация управления всеми элементами процесса доведена до весьма высокого уровня. На пульте управления станции оператор может по приборам следить за работой каждого промежуточного звена. Перед глазами оператора находятся измерители мощности и указатели положения регулирующих стержней; приборы, отмечающие температуру, давление и количество воды, протекающей в каждом из 128 рабочих каналов реактора. Здесь же оператор получает сведения о давлении пара, идущего в турбину, о работе всех насосов и парогенераторов.

В соответствии с показаниями приборов, оператор, находясь у пульта, может устранить могущие возникнуть различные неполадки. Но даже в том случае, если бы оператор не принял необходимых мер, авария не произойдет, так как аварийные стержни сами опустятся в реактор и остановят цепной процесс.

На особом дозиметрическом пульте находятся приборы, сигнализирующие о наличии опасных радиоактивных излучений в различных помещениях электростанции. Оператор всегда будет пре-

дупрежден световым и звуковым сигналами, в каком помещении излучение превышает норму. Кроме того, в этом помещении автоматически вспыхивает красная лампа и дается звуковой сигнал.

Радиоактивная пыль и газы, отсасываемые из помещений электростанции, поступают в высокую трубу и выбрасываются в атмосферу. Высота трубы гарантирует полную безопасность для окружающего населения.

На здоровье обслуживающего персонала работа станции не оказывает вредного влияния. За все время работы атомной электростанции не было ни одного случая переоблучения персонала.

Питание всех агрегатов станции производится за счет вырабатываемой ею электроэнергии. Однако в случае аварии в электрической сети питание всех механизмов и приборов автоматически переключается на аккумуляторную батарею.

Электрическая энергия атомной электростанции поступает на трансформаторную подстанцию, включенную в общее высоковольтное кольцо.

За первый год своей работы эта электростанция дала стране 15 млн. квт-ч. Расход урана в сутки составляет 30 г. Положительный опыт работы первой атомной электростанции дает обнадёживающие данные для проектирования и строительства новых атомных электростанций, которые имеют важное значение для развития нашей энергетики.

Известно, что в наши дни основным источником энергии служит органическое топливо (уголь, нефть, торф и т. п.).

По данным Женевской научно-технической конференции, в настоящее время в передовых индустриальных странах мира ежегодное потребление

энергии на душу населения составляет от 23 до 54 квт-ч, причем 80% всей производимой в настоящее время энергии покрывается за счет угля, нефти и газа (уже сейчас ежегодно сжигается около 1,7 млрд. т. каменного угля). Потребность в энергии быстро растет. По тем же данным, мировое производство электроэнергии удваивается за 10 лет и удесятерится за 33 года. Предполагается, что к 2000-му году мировые энергетические потребности возрастут примерно в три раза.

Мировое производство гидроэлектроэнергии, в настоящее время покрывающее лишь 1,5% всей потребности в энергии, значительно возрастет к тому времени, но все же составит не более 15% от всей потребности. Если же рост потребности в энергии удовлетворять за счет органических топлив, то потребуются сжигать ежегодно 7—8 млрд. т каменного угля. Между тем, топливные ресурсы в отдельных странах в настоящее время уже значительно истощены, добыча угля и нефти осложняется и стоимость их увеличивается.

Перед многими странами уже сейчас реально встает задача ввиду истощения запасов топлива найти и использовать другие источники энергии. Ядерная энергия призвана сыграть важную роль в разрешении этой проблемы.

Стоимость ядерной энергии с прогрессом техники будет уменьшаться, запасы же урана и тория велики. Количество энергии, которое содержится в разведанных запасах этих элементов, во много раз превышает количество энергии, содержащейся во всех других ее источниках.

Серьезным преимуществом ядерного «горючего» перед всеми другими видами горючего является его высокая энергоемкость. Это позволяет

использовать ядерную энергию в районах, значительно удаленных от мест добычи урана или тория, так как транспортировка ядерного «горючего» требует относительно мало затрат.

На просторах Сибири Советский Союз располагает разнообразными природными энергетическими ресурсами. На ближайшие десятилетия имеющихся у нас энергетических ресурсов будет достаточно и в Европейской части СССР, но в несколько более отдаленном будущем ядерная энергия может оказаться тем практически неисчерпаемым и относительно дешевым источником, который обеспечит изобилие энергии в этой части страны.

В статье «Некоторые вопросы развития атомной энергетики в СССР» академик И. В. Курчатов указывает, что надо создать ядерную энергетику, которая по крайней мере для условий европейской части Союза будет экономически более выгодной, нежели угольная энергетика.

В Советском Союзе намечено построить крупные атомные электростанции мощностью первое время около 400—600 тыс. квт каждая; только на крупных атомных электростанциях можно достигнуть экономически выгодных показателей.

В пятилетке 1956—1960 гг. намечено построить пять больших атомных электростанций. По этой программе станции начнут входить в строй с конца 1958 года; часть их начнет работать с 1959 года, а некоторые в 1960 г.

Новые атомные электростанции будут построены с реакторами, работающими с медленными нейтронами. Как работают такие реакторы? В них нейтроны, освобождающиеся в процессе деления и обладающие большой энергией, замедляются перед тем как принять участие в даль-

нейшем процессе деления. Что нужно для того, чтобы стала возможной ядерная цепная реакция с медленными нейтронами? Для этого в реакторах находится специальное вещество — замедлитель. В качестве замедлителей в проектируемых атомных электростанциях будут использованы вода, графит и тяжелая вода.

Какое «топливо» будет использоваться в реакторах, проектируемых для больших атомных электростанций? Там, где вода будет служить для замедления нейтронов, «топливом» явятся стержни из двуокиси природного и обогащенного урана, снабженные защитной оболочкой из циркониевого сплава. Вода под давлением 100 атм. при температуре 250°С поступит в реактор, где будет нагреваться на 20—25°С за счет теплоты, выделяющейся в процессе ядерной реакции деления, затем она, проходя через парогенератор, отдаст энергию воде и пару и направится при помощи насосов снова в реактор. Таким образом, двигаясь по замкнутому контуру, вода будет переносить теплоту из реактора в парогенератор для получения насыщенного пара при давлении 30 атм. Этот пар приведет в действие специальные турбины, мощностью по 70 тыс. квт каждая. От одного реактора будут работать три турбины. Реактор, находящийся под высоким давлением, будет заключен в стальной толстостенный корпус, способный выдержать большое давление.

Одна атомная электростанция будет построена с реактором такого же типа, который уже осуществлен на первой действующей электростанции Советского Союза. Графит в ней будет служить замедлителем. В графитовом замедлителе в виде отдельных блоков разместится в форме специального сплава делящийся материал (обогащенный

уран). Каждый блок будет представлять собой полый цилиндр, охватывающий стальную трубу, по которой должна протекать охлаждающая вода и пар. Блок снаружи снабжен стальным покрытием. В целом блоки со своей системой охлаждения должны образовать отдельные рабочие каналы, пронизывающие графитовую кладку. Отвод теплоты в большинстве каналов осуществляется водой при высоком давлении, которая будет нагреваться до температуры кипения и испаряться. Полученный пар служит для отвода теплоты из остальных каналов, где он нагревается до температуры 500°С. После этого пар поступает в парогенератор и отдает энергию воде паротурбинного цикла. На этой станции две турбины мощностью по 100 тыс. квт будут работать при давлении 90 атм. на перегретом до 480—500°С паре.

На атомной электростанции третьего типа будет установлен реактор с замедлением нейтронов тяжелой водой. Отвод теплоты будет осуществляться углекислым газом, циркулирующим по замкнутому контуру и охлаждающим каналы, в которых размещаются прутки из природного урана, служащие «топливом».

Общая мощность строящихся в шестой пятилетке атомных электростанций 2—2,5 млн. квт. Кроме мощных атомных электростанций, будет построено и введено в действие в 1959—1960 гг. несколько экспериментальных атомных установок.

Будут построены реакторы с быстрыми, медленными нейтронами и с нейтронами промежуточных энергий; с замедлителями из графита, бериллия, тяжелой (рис. 60) и обычной воды; с газовым, водяным и металлическим охлаждением.

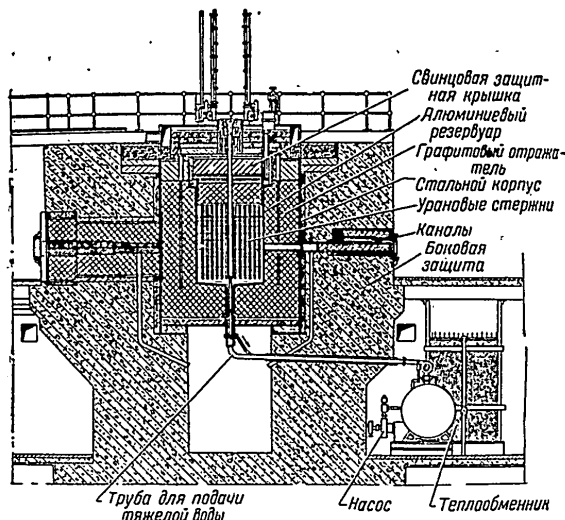


Рис. 60. Продольный разрез советского экспериментального ядерного реактора с тяжелой водой в качестве теплоносителя

Будет построен мощный реактор с использованием тория.

Одной из экспериментальных установок с электрической мощностью в 50 тыс. квт будет реактор с тепловыми нейтронами с замедлением кипящей водой и с турбиной, работающей на слабо-радиоактивном паре, идущем прямо из реактора. Эта установка явится естественным развитием реактора с водяным охлаждением, отличающа отсутствием парогенератора и возможностью работы на значительно более низком давлении.

На другой экспериментальной установке также с электрической мощностью 50 тыс. квт устанавливается приспособленный для расширенного воспроизводства ядерного «горючего» гомогенный реактор, в котором «горючее» находится не в виде стержней или пластин, а в виде тонкого порошка, взвешенного в тяжелой воде. Этот реактор предназначен для расширенного воспроизводства «горючего» в цикле торий 232 — уран 233.

Будет построен также реактор с графитовым замедлителем и отводом теплоты при помощи расплавленного натрия. Какова схема работы этого реактора? Она отличается от схем первых двух тем, что вода заменена натрием. Это позволяет, не прибегая к высокому давлению в контуре, нагреть в реакторе теплоноситель до высокой температуры и затем получить в парогенераторе пар с высокими температурой и давлением.

Предполагается сооружение реактора, работающего с быстрыми нейтронами с теплоотводом при помощи натрия и предназначенного для расширенного воспроизводства «горючего». Сжигание ядерного «горючего» в отличие от обычного топлива дает возможность получать новые вещества — плутоний и уран 233, которых нет в природе и которые также могут служить «топливом». В этом заключается воспроизводство ядерного «горючего». При определенных условиях новое «горючее» образуется в количествах, превышающих количество исходного «топлива», сгоревшего в цепном процессе. В этом случае осуществляется так называемое расширенное воспроизводство. Например, уран 238, захватывая нейтроны, затем в результате процессов радиоактивного распада превращается в новое ядерное «горючее» плутоний 239.

Ведутся работы по созданию реакторов с замедлением нейтронов водой. Такие реакторы сравнительно невелики по размерам и просты по конструкции. Это позволяет рассчитывать на то, что затраты на сооружение атомной станции с водяным охлаждением будут минимальными. Кроме того, есть основание думать, что эти реакторы будут экономичными и по использованию урана. Для экономичного производства электроэнергии из ядерной энергии очень большое значение имеет воспроизводство ядерного «топлива». При длительной работе реактора в результате ядерных реакций в уране образуется плутоний 239, плутоний 240 и плутоний 241.

Выполнение нашей пятилетней программы опытного строительства атомных электростанций обеспечит более широкие возможности выбора наилучшего пути развития будущей атомной энергетики.

В советской и иностранной печати приводится большой фактический материал о возможных типах ядерных реакторов для атомных электростанций.

На стр. 245 в таблице приведены данные о возможных типах ядерных реакторов для атомных электростанций.

В этой таблице приведена весьма краткая характеристика атомных реакторов; выше указывалось, что реакторы могут различаться не только ядерным «горючим», но и замедлителем; если они должны работать с медленными нейтронами, а также охладителем, в качестве которого могут применяться газы (гелий, двуокись углерода), вода (обычная или тяжелая), жидкие металлы (натрий, сплав натрия с калием, висмут и др.).

Конечно, надо иметь в виду различные конструкции атомных реакторов, форму распределе-

ния в них ядерного «горючего» и замедлителя, а также и его целевое назначение. Как упоминалось, атомные реакторы предназначены быть источником энергии, которая в форме теплоты

№ по пор.	Ядерное «горючее»	Сырье для получения ядерного «горючего»	Тип ядерной реакции	Есть ли возврат ядерного «горючего»	Продукт работы реактора	Примечание
1	U ²³⁵	U ²³⁸	С медленными нейтронами	Нет	Pu ²³⁹	Используется природный уран, расход которого велик
2	U ²³⁵	U ²³⁸	То же	Да	Pu ²³⁹	Используется обогащенный уран. Необходим завод для обогащения урана изотопом U ²³⁵
3	U ²³⁵	Th ²³²	"	"	U ²³³	Необходим завод для выделения изотопа U ²³⁵
4	U ²³³	Th ²³²	"	"	U ²³³	После пуска в ход требуется только торий
5	Pu ²³⁹	Th ²³²	"	"	U ²³³	Pu ²³⁹ может получаться от реактора (2)
6	U ²³³	Th ²³²	С быстрыми нейтронами	"	U ²³³	Избыток U ²³³ может быть использован для реактора (3) и (4)
7	Pu ²³⁹	U ²³⁸	То же	"	Pu ²³⁹	Можно производить U ²³³ , если U ²³⁹ заменить на Th ²³²
8	U ²³⁵	U ²³⁸ или Th ²³²	"	"	Pu ²³⁹ или U ²³³	Необходим завод для выделения U ²³⁵

отводится охладителем и им передается в теплообменнике воде, причем образуемый при этом пар может быть использован либо в паровой машине, либо турбине.

В качестве примера атомных реакторов мощностью 500 000 квт каждый для энергетических целей приведем характеристики двух реакторов; один с медленными нейтронами и замедлителем

	Водяное охлаждение (реактор с медленными нейтронами)	Натриевое охлаждение (реактор с быстрыми нейтронами)
Мощность		
тепловая	500 000 квт	500 000 квт
электрическая	~ 100 000 квт	~ 150 000 квт
Диаметр сердечника	~ 4 м	~ 1 м
Высота сердечника	~ 3,3 м	~ 1 м
Топливо	Природный уран	Уран 235
Замедлитель	D ₂ O	Pb
Отражатель	H ₂ O	Бетон
Защита	Бетон	
Охлаждающая жидкость		
входная температура	195°	315°
выходная температура	260°	480°
Вторичное охлаждение (охлаждение охлаждающей жидкости)		
входная температура	—	290°
выходная температура	—	455°
Пар		
давление	11 атм	32 атм
температура	190°	400°

246

в виде тяжелой воды, а другой с быстрыми нейтронами, значит без замедлителей. Цепная реакция расщепления осуществляется в так называемом сердечнике. Реактор с медленными нейтронами снабжен водяным охлаждением, реактор с быстрыми нейтронами — натриевым охлаждением.

Атомный реактор как мощный источник нейтронов может быть использован, как мы указывали, для получения ядерного «горючего», то есть изотопов Рс²³⁹ и U²³³, или для получения тех или иных изотопов за счет так называемой (*n, γ*) реакции. Например, облучение нейтронами природного кобальта Co⁵⁹ приводит к образованию изотопа Co⁶⁰: ${}_{27}\text{Co}^{59} + n^1 = {}_{27}\text{Co}^{60} + \gamma$; в этом случае, как и во всех (*n, γ*) реакциях нейтрон поглощается ядром атома изотопа, а образующееся атомное ядро нового изотопа избыток энергии, принесенный с собой нейтроном, испускает в виде гамма-фотона.

Наконец, атомный реактор широко используют для научно-исследовательских целей, главным образом для изучения поведения различных веществ под воздействием потока нейтронов при различных температурах.

Выявление веществ, не изменяющихся существенно в потоке нейтронов при повышенной температуре, имеет огромное значение в атомной технике. Так, например, установлено, что цирконий (Zr) в свободном виде в форме металла почти не изменяется при высокой температуре ни от воздуха, ни от воды и водяного пара. Цирконий является одним из важнейших материалов в атомной технике будущего.

Однако для этих целей необходим цирконий высшей чистоты, почти без примесей, поэтому

247

17*

атомная техника предъявила химии трудную задачу получения чистого циркония, главным образом освободив его от примеси элемента гафния, всегда ему сопутствующего в природных минералах.

Отделение гафния от циркония очень трудная задача из-за весьма близких химических свойств этих двух элементов.

Современная химия успешно разрешила эту задачу и ею разработаны методы получения чистого циркония. Этот пример иллюстрирует собой то, что атомная техника поставила перед химией и химической промышленностью множество задач и от успешного их разрешения зависит также и развитие мирного использования ядерной энергии.

Важное значение имеет разработка и внедрение атомной техники для транспортных целей в авиации, ракетной технике, в морском флоте на кораблях и подводных лодках. Основными элементами атомной подводной лодки являются ядерный реактор, паровой котел и турбина, соединенная с винтом корабля. Атомные подводные лодки обладают тем важным преимуществом, что они могут находиться под водой значительно дольше, чем обычные подводные лодки. На них, в частности, можно совершать плавание под льдом. Атомные двигатели могут использоваться и на ледоколах, благодаря чему радиус их действия значительно возрастает. Это объясняется тем, что атомное «горючее», занимающее очень мало места, позволит совершить длительные рейсы без захода в порт для заправки (это, конечно, относится и к другим видам транспорта). Атомные корабли явятся для человека новым мощным средством научных исследований в Арктике и Антарктике.

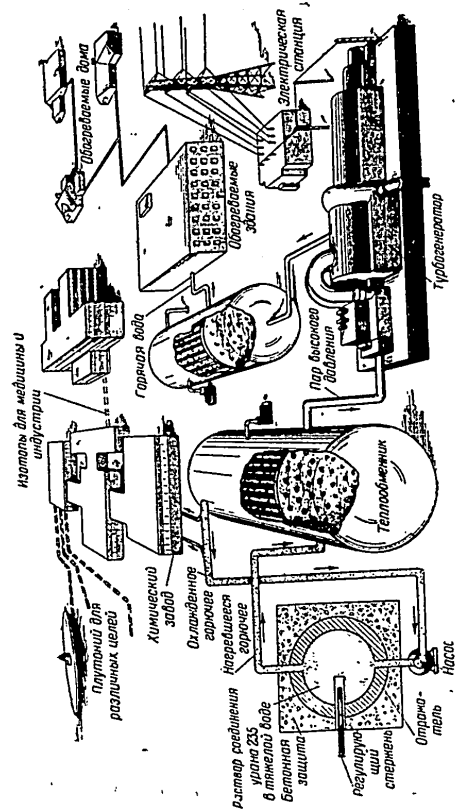


Рис. 61. Схема действия атомной электростанции и пути использования отходов

В шестой пятилетке в СССР будет построен мощный ледокол с атомным двигателем, предназначенный проводить суда по северному морскому пути; взламывая лед и открывая путь обычным судам. Этот ледокол может работать без пополнения топливом в течение двух — трех лет.

На ледоколе с атомной установкой суточный расход «горючего» — урана — исчисляется граммами. Поэтому район плавания такого ледокола становится практически неограниченным.

Конструкторы получают возможность использовать ту часть водоизмещения корабля, которая отводится для хранения топлива¹, на повышение мощности силовой установки и увеличение прочности корпуса. Такой ледокол сможет прокладывать путь в тяжелых арктических льдах, не проходимых для современных ледоколов.

Новый ледокол будет обладать мощностью главных двигателей в 44 тыс. л. с. Его водоизмещение 16 тыс. т. Личный состав корабля надежно защищен от вредных радиоактивных излучений, возникающих в атомной установке. Управление ею осуществляется дистанционно — при помощи средств автоматики. Автоматика и телемеханика значительно облегчают труд команды. Кочегаров здесь заменяет операторы, работающие у пульта управления. Управление кораблем максимально автоматизировано. Оно осуществляется капитаном с верхнего мостика или из ходовой рубки.

¹ На обычных ледоколах до 30% водоизмещения судна используется под запасы топлива, исчисляемые тысячами тонн. На ледоколах советского арктического флота, например, такие запасы достигают трех тысяч тонн на одном судне. Суточный же расход его превышает сто тонн. Таким образом, ледоколы лишены возможности отходить далеко от портов на длительное время.

Сейчас нам трудно даже представить себе, как велики и поистине неисчерпаемы возможности всестороннего использования энергии атомных ядер. Давно уже люди мечтают о создании не больших, но производительных источников энергии, которые можно было бы использовать в повседневной жизни. Осуществление этой мечты станет возможным тогда, когда будет создан атомный двигатель. Этот двигатель совершит настоящую техническую революцию во всех областях народного хозяйства.

Можно себе представить, что такой двигатель появится на автомашине. Это позволит сэкономить огромное количество высококачественного жидкого топлива. Если, например, автомашине «Победа» для того, чтобы пройти 100 км, нужно примерно 14 кг бензина, то для такого же пробега при работе атомного двигателя понадобится совершенно ничтожное количество ядерного «горючего» — всего лишь несколько сотых грамма. Ученые подсчитали, что если допустить около 10% «выгорания» ядерного «топлива», то для атомного автомобиля, совершающего кругосветное путешествие, нужно всего лишь около 25 г ядерного «горючего». Конечно, постройка такого двигателя сопряжена с рядом очень больших технических трудностей. Одна из них заключается в том, что современные установки, производящие ядерную энергию, пока еще весьма велики и громоздки. Но нет сомнения, что ученые и инженеры создадут небольшие и компактные атомные двигатели.

В авиации атомный двигатель также несомненно найдет широкое применение. Ведь современный бензиновый поршневой двигатель расходует очень много дефицитного топлива. Так, авиационному

двигателю мощностью около 2000 л. с. необходимо для часа полета примерно 0,5 т бензина. Поэтому воздушный рейс многомоторного самолета на расстояние в несколько тысяч километров требует запасов горючего в десятки тонн. Это значительно увеличивает вес самолета, что отрицательно сказывается на его маневренности, значительно снижает дальность и скорость полета. Кроме того, тяжелый самолет нуждается в большой взлетной и посадочной площадках. Иначе будет обстоять дело после установки на самолетах атомного двигателя. Для такого двигателя мощностью 2000 л. с. потребуется на час полета всего лишь 0,3 г урана и, следовательно, отпадает необходимость в больших запасах горючего на борту самолета. Это не только позволит увеличить дальность и скорость полета, но и улучшит аэродинамические свойства самолетов.

Каких типов могут быть авиационные атомные двигатели? Самых различных. Наиболее вероятны две основные схемы такого атомного двигателя: турбовинтовая и реактивная. В случае турбовинтового двигателя необходимая для полета сила тяги создается винтом, вращаемым валом турбины двигателя. Основа действия реактивного двигателя — так называемая реактивная отдача, получающаяся при выходе из сопла газов, которые нагреваются за счет тепла, выделяющегося в атомном реакторе.

Сильное радиоактивное излучение, возникающее при работе атомного двигателя, является огромным его недостатком. Как преодолеть этот недостаток атомного двигателя? В настоящее время разрабатываются эффективные способы защиты людей от этого излучения. Без защиты атомный двигатель может применяться только на

машинах или ракетах, управляемых на расстоянии и не требующих присутствия людей.

Ученые изыскивают методы прямого преобразования атомной энергии в электрическую. Мы уже говорили выше, что на атомной электростанции в результате ядерной реакции сначала получается теплота, которую используют для образования пара, приводящего в движение турбину, связанную с генератором, в котором полученная за счет теплоты механическая энергия преобразуется в электрическую энергию. Можно ли избежать этих промежуточных процессов, то есть предварительного перехода атомной энергии в теплоту и механическую энергию? Да, можно. Для этого используют так называемый вольтэлектронный эффект. В атомных котлах образуются искусственные радиоактивные изотопы, например стронций 90. Он создает сильный поток электронов, не сопровождающийся гамма-излучением. Эта особенность стронция 90, исключая необходимость применения защиты от гамма-лучей, позволяет создать своеобразный и простой аккумулятор электрической энергии.

На полупроводник, подвергнутый особой обработке, наносится тонкий слой стронция 90. При прохождении через полупроводник электроны, излучаемые стронцием, «размножаются», выбивая новые электроны из атомов полупроводника. Такое размножение электронов осуществляется с большой эффективностью: на один электрон стронция образуется 200 тыс. новых электронов.

Так возникает электрический ток, правда, незначительной величины (порядка миллионных долей ампера) и очень малого напряжения (порядка десятых долей вольта). Однако, строя батареи из таких микроаккумуляторов, удастся получить

достаточно большие токи. Атомные батареи могут, например, обслуживать телефоны, радиопаратуру и т. д. Швейцарские часовщики применили атомные аккумуляторы для приведения в действие механизма часов.

Атомная электрическая батарея может действовать без зарядки, то есть без смены радиоактивного изотопа, длительное время, во всяком случае несколько десятков лет. Радиостанция, в которой атомная энергия будет непосредственно преобразовываться в энергию радиоволн, займет очень мало места — она сможет уместиться на ладони. Таков один из возможных путей практического применения атомной энергии в технике.

Не останавливаясь больше на разделе — энергетика как одна из форм мирного использования ядерной энергии, — охарактеризуем кратко пути применения меченых атомов. Выше упоминалось, что мечеными атомами могут быть либо атомы радиоактивного изотопа, либо атомы устойчивого изотопа, отличающиеся по величине массового числа от другого изотопа того же элемента.

Радиоактивные атомы в соответствии со своим периодом полураспада рано или поздно проявят себя по радиоактивному излучению, которое они испускают в соответствующий момент. Нерадиоактивные атомы могут быть мечеными, если они отличаются по величине массы от атомов применяемого изотопа. Так, если изучается поведение кислорода в той или иной системе, который, как известно, состоит из трех изотопов O^{16} (99,757%), O^{17} (0,039%) и O^{18} (0,204%). Здесь в скобках приведены процентные содержания изотопов в природном кислороде, то изотоп O^{17} или O^{18} , введенный добавочно в природный кислород, «помечен»

его тем, что изотопный состав его будет иной.

Химические свойства меченых атомов ничем не отличаются от химических свойств атомов того же элемента, поэтому добавление меченых атомов какого-либо элемента в тот же элемент природного происхождения «метит» его, не меняя химических свойств, и позволяет проследить за ним в тех или иных реакциях или в тех или иных процессах. Использование меченых атомов широко раздвинуло границы изучения поведения того или иного элемента в каком-либо процессе, и тем самым помогло глубже и детальнее изучить течение многих процессов, будь то в неорганическом мире или в живых организмах.

Метод меченых атомов позволяет биологам изучать физиологические процессы, протекающие в растениях и почве. Используя этот метод, удалось установить закономерности поступления воды и питательных веществ из почвы в организм растения и распределение их между отдельными частями растения, что позволило установить, какую роль играет корневое питание в обмене веществ растительного организма.

Советские ученые, используя меченый радиоактивный фосфор, доказали, что фосфорные удобрения усваиваются через листья хлопчатника при так называемой внекорневой подкормке перед созреванием.

Внекорневая подкормка фосфором хлопчатника может быть использована в качестве одного из средств борьбы с опаданием завязей, а поздняя внекорневая подкормка сахарной свеклы — средство повышения сахаристости корнеплода.

С помощью радиоактивного фосфора советские ученые установили отличия в усвояемости расте-

ниями различных фосфорных удобрений и определили коэффициент использования растениями этих удобрений. Радиоактивные изотопы применяются также для уничтожения вредных насекомых.

С помощью радиоактивного фосфора установлено интересное ранее неизвестное явление. Оказалось, что в дубовом лесу срастаются корнями по 30 и более деревьев, образуя своеобразную корневую систему. Любопытно, что по этой системе передаются не только питательные вещества, но и возбудители инфекционных заболеваний. Так впервые было объяснено, почему мы часто встречаемся в лесу с одновременным заболеванием многих деревьев.

Применение меченых атомов дало возможность ученым познать такие глубокие процессы жизнедеятельности организма, которые не могли быть изучены другими методами. Метод меченых атомов позволил заглянуть внутрь важнейшего органа — мозга, — не нарушая его деятельности.

Установлено, что для живого организма громадное значение имеет фосфорный обмен. Исследования процессов возбуждения и торможения бодрствующего и спящего мозга животного вскрыли картину резкой разницы в интенсивности фосфорного обмена в обоих состояниях мозга и обнаружило, таким образом, биохимический фундамент установленных И. П. Павловым состояний возбуждения и торможения участков мозга.

В медицине метод меченых атомов находит себе применение для изучения распределения элементов в живом организме; с помощью изотопа ^{24}Na , вводимого в кровь в форме хлористого натрия, можно изучать движения крови в организме и скорость ее поступления в отдельные органы живого организма.

Радиоактивные изотопы становятся все более мощным и распространенным лечебным средством. Изотопы кобальта, йода, фосфора, натрия и других элементов используются для лечения и диагностики различных заболеваний, особенно раковых опухолей, болезней крови и кожи. Медицина, конечно, еще не выявила все особенности воздействия радиоактивного излучения на больные органы и ткани, но уже сейчас ясно, что перед нами огромные перспективы в великом деле охраны здоровья людей.

Сейчас трудно назвать такую область науки и техники, где не применялся бы метод меченых атомов. На Женевской конференции приводились десятки примеров самого широкого использования меченых атомов. Вот некоторые из них.

Для обнаружения скрытых дефектов в металлических отливках раньше применялись рентгеновы лучи. Но этот способ имеет существенный недостаток: глубина просвечивания очень невелика и обычно не превышает 2—3 см. К тому же аппаратура для рентгеновского просвечивания очень громоздка. В то же время гамма-лучи могут проникнуть в глубь металлических изделий на десятки сантиметров, а аппаратура для осуществления такого метода довольно проста и портативна. Дефектоскопия нашла большое применение в целях усовершенствования технологического процесса и контроля производства в машиностроении и приборостроении, в строительстве и других областях техники. Этот метод позволяет быстро и точно обнаруживать дефекты в различных изделиях и конструкциях, определять качество сварных соединений и т. д.

Применение радиоактивных изотопов позволяет производить измерение толщины листа стали не-

посредственно в процессе прокатки, что имеет весьма большое значение для металлургического производства.

Метод меченых атомов отличается очень высокой чувствительностью, несравнимой ни с одним из известных нам способов контроля технического процесса. Так, с помощью радиоактивного излучения можно определить износ деталей машин, измеряемый одной стотысячной долей грамма, и, что очень важно, осуществить это без остановки машины. Для этого в трущиеся и изнашиваемые детали, например, в шарикоподшипники вводятся радиоактивные вещества, при этом контроль за радиоактивностью смазки позволяет установить величину износа исследуемой детали. Точно так же если «пометить» волокна шин, то можно осуществить контроль их износа и выявить режим работы, приводящий к их быстрому износу.

С помощью этого метода можно следить за процессом изнашивания деталей машин, в частности поршневых колец в двигателе внутреннего сгорания, без остановки машины и ее разборки. В изучаемую деталь заранее вводят радиоактивный изотоп. Частицы металла, отделяющиеся при трении во время работы машины от детали, уносятся потоком масла. Специальные счетчики регистрируют излучение от этих частиц. Этим путем изучалось изнашивание поршневых колец; таким же методом удастся следить за износом режущего инструмента. Меченые атомы позволили разработать простой способ определения примесей в паре парового котла и помогают распознать, каково вредное действие, оказываемое этими примесями на материал котла.

258

Хорошим способом маркировки стали при прокате оказался метод меченых атомов. Вещество, содержащее тот или иной радиоактивный элемент, наносят на раскаленное прокатываемое изделие. При рассортировке готовой продукции специальный счетчик, поднесенный к изделию, сразу указывает марку стали изделия.

На строительстве Куйбышевской, Сталинградской, Каховской и других крупных гидроэлектростанций СССР были применены специальные радиоактивные приборы для непрерывного дистанционного измерения содержания грунта в пульпе землесосных снарядов. Это позволило повысить производительность землесосов на 15—20%. В США радиоактивные изотопы были применены для измерения скорости потока жидкостей в трубах, в нефтяных скважинах и в подземных водах, для обнаружения, в полевых условиях водоносных горизонтов в нефтяных скважинах и т. п.

С помощью меченых атомов производится измерение содержания влаги в почве, измерение количества воздуха в гидравлических трубопроводах, обнаруживаются примеси серы в нефтепродуктах, определяется толщина снегового покрова. Радиоактивные изотопы нашли применение для изучения движения морских песков; с помощью радиоактивных изотопов в устье Темзы (Англия) изучалось движение ила. В Англии вода, содержащая радиоактивный изотоп водорода — тритий, используется в качестве индикатора для измерения течи в морских подводных сооружениях. Течь, которая могла оставаться незамеченной в течение 20 лет, по активности трития обнаруживается за один час.

Важное значение имеет применение меченых атомов — радиоактивных и стабильных изотопов

259

ряда элементов — для изучения механизма различных химических реакций. Этот вопрос имеет огромное практическое значение, так как, познав механизм данной реакции, мы получаем возможность рационально управлять ее течением, направлять реакцию по пути образования максимально возможных выходов ценных продуктов.

Ученые доказали, что с помощью радиоактивного углерода можно определять «возраст» веществ и предметов органического происхождения. Как известно, в атмосфере земли имеется небольшое количество углекислого газа, в состав которого входит и радиоактивный изотоп углерода. Вместе с углекислым газом в растения попадают атомы радиоактивного углерода. Как только растение погибает, число меченых атомов углерода в нем начинает уменьшаться. Через 6 тыс. лет таких атомов останется только половина, а через 12 тыс. лет — одна четверть. Зная период полураспада радиоактивного изотопа углерода, можно по величине радиоактивности определять «возраст», например, древних построек. Так, в частности, было установлено, что деревянная гробница, остатки которой были найдены в пустыне Сахара, сделана около 4750 лет назад.

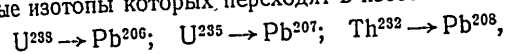
В настоящее время выдвинута гипотеза происхождения земли из холодной пыли (а не из расплавленной массы); объяснение теплового состояния земного шара может быть дано только в предположении, что тепловой режим земли в основном определяется энергией, выделяемой содержащимися в ней радиоактивными веществами.

В геологии метод меченых атомов нашел широкое использование. Известно, что уран 238 распадается с определенной скоростью, образуя в конечном счете гелий (He) и свинец (Pb). Для

260

превращения 1% урана в свинец требуется 75 млн. лет.

Определение в минерале, содержащем уран, процентного содержания свинца и урана, позволяет рассчитать возраст минерала, а следовательно, и возраст горной породы. Таким образом, радиоактивность урана, а также тория, природных изотопы которых переходят в изотопы свинца



позволяет оценивать возраст горных пород, а в ряде случаев и возраст земной коры, который оценен величиной пять миллиардов лет.

Природные радиоактивные изотопы калия, рубидия и углерода также в ряде случаев позволяют произвести оценку возраста горных пород; изотоп калия K^{40} переходит в Ar^{40} , рубидия Rb^{87} в стронций Sr^{87} , углерода C^{14} в азот N^{14} . Оценивая количество аргона в калиевых минералах и стронция в рубидиевых, можно определить возраст минералов.

Изучение украинского горного массива дало возможность установить три крупных эпохи вулканизма, в течение которых произошло образование главной массы изверженных пород, имевших место соответственно 2800 ± 200 , 2000 ± 100 , 1100 ± 200 миллионов лет тому назад.

Можно многими примерами проиллюстрировать применение метода меченых атомов в различных научных исследованиях и разных областях техники, однако ограничимся сказанным и рассмотрим использование радиоактивных излучений. Действие радиоактивных излучений на различные вещества и их смеси, вызывающее в них химические превращения, изучает новая наука, называемая радиационной химией. Радио-

261

активные излучения вызывают разложение воды (радиолиз воды), разложение многих неорганических и органических веществ, а также приводят их в возбужденное состояние, способствующее течению химических реакций.

Мощное радиоактивное излучение ускоряет процесс полимеризации и даже делает реальным получение новых полимеров, так этилен под воздействием гамма-лучей переходит в полиэтилен — пластмассу, имеющую большое практическое значение.

У некоторых пластмасс при облучении их гамма-лучами изменяются свойства. При облучении полиэтилена и полистирола повышаются их термостойкость, химическая стойкость и возникают у них новые ценные свойства. Пластмасса переходит в состояние, аналогичное вулканизированному каучуку.

Гамма-лучи в больших дозах убивают микроорганизмы и поэтому их можно использовать для холодной стерилизации медицинских материалов, а также для стерилизации и консервирования пищевых продуктов.

Облученные фрукты, овощи, молочные продукты сохраняются без порчи длительное время. Картофель, подвергнутый действию гамма-лучей, не прорастает и не прорастает более года.

Предпосевная обработка семян растворами солей радиоактивных изотопов, например, фосфора (P^{32}), цинка (Zn^{65}), кальция (Ca^{45}) и др. повышает всхожесть и поднимает урожайность на 17—20%. Установлено, что радиоактивные изотопы, воздействуя своим излучением, повышают всхожесть и усиливают кущение пшеницы, повышают всхожесть клевера и вызывают увеличение веса корневой лупины.

В медицинской практике нашли применение изотопы: натрий 24 (Na^{24}), кобальт 60 (Co^{60}), фосфор 32 (P^{32}), иод 131 (I^{131}), золото 198 (Au^{198}) и др.

Наибольшее применение нашли, как мы указывали, некоторые радиоактивные изотопы при лечении злокачественных и доброкачественных опухолей, заболеваний кровеносных органов и кожи. Особенно широко используется изотоп Co^{60} , вводимый в организм с помощью иглы, аппликатора, а также используемый в качестве источника гамма-излучения.

Использование радиоактивных излучений открыло новые пути в измерительной технике. В настоящее время разработано много новых приборов: уровнемеры, плотномеры, приборы для определения плотности пульпы в землесосных снарядах и др. Действие всех этих приборов основано на том, что радиоактивное излучение легко обнаруживается специальными счетчиками и что гамма-лучи проходят сквозь толщину материалов, частично поглощаясь в них.

Так, с помощью гамма-лучей легко обнаруживать дефекты внутри сплошных изделий (дефектоскопия), выявлять дефекты в сварных швах и т. д.

Если в самом начале своего развития мирное использование ядерной энергии нашло столь широкое применение, то легко заключить, что в ближайшем будущем ядерная энергия найдет еще большее и разнообразное применение в различных областях науки и техники. Поистине грандиозные масштабы применения ядерной энергии ждут нас в ближайшем будущем. Однако не следует забывать, что все большее и большее применение ядерной энергии заставляет нас думать

и о защите людей от вредного влияния радиоактивных излучений.

Известно, что атомные реакторы являются источниками проникающего излучения — быстрых нейтронов и гамма-лучей, — вредно действующих на живой организм. Однако для проникающей способности ядерного излучения существуют определенные пределы. Так, установлено, что слой грунта толщиной 14 см, слой дерева толщиной 25 см, броня толщиной 2,8 см и слой бетона толщиной 10 см ослабляют проникающую радиацию в 2 раза; слой грунта толщиной 56 см, слой дерева толщиной 100 см, броня толщиной 11,2 см и слой бетона толщиной 40 см ослабляют проникающую радиацию в 16 раз. Кроме того, потоки нейтронов и гамма-лучей полностью поглощаются достаточно толстым слоем воды. Эти свойства материалов поглощать радиоактивное излучение используются для защиты людей, работающих с ядерными реакторами и радиоактивными препаратами. Помимо того, что ядерные установки автоматизированы и управляются дистанционно, они окружены защитными стенками из веществ, способных поглощать нейтроны и гамма-излучение. Если атомный реактор имеет небольшую мощность, для защиты используется бетон. В других случаях применяется свинец, особенно хорошо задерживающий гамма-лучи, а также кадмий или бор, весьма сильно поглощающие медленные нейтроны. Но и при этом работа с радиоактивными веществами и установками, конечно, требует осторожности и специальных защитных мер.

Необходимо иметь в виду опасность заражения почвы и водоемов радиоактивными изотопами. Например, работа атомных реакторов сопряжена

с образованием огромных количеств радиоактивных изотопов, которые надо удалять (например, зарывать в землю на большую глубину), чтобы они ни в настоящее время, ни будущим поколениям не могли оказать вредного действия.

Мощность в 1 ватт, развиваемая атомным реактором, сопряжена с расщеплением в одну секунду $3 \cdot 10^{10}$ атомных ядер урана, что дает примерно 1,7 кюри — единиц количества радиоактивных изотопов, действие которых эквивалентно действию 1,7 г радия. Следовательно, атомный реактор мощностью в 100 000 квт за одни сутки будет образовывать количество радиоактивных изотопов, которое по своему действию эквивалентно тоннам радия, то есть в атомном реакторе мощностью 100 тыс. квт в одну секунду образуется огромное количество радиоактивных изотопов как «осколочных» элементов, возникающих при расщеплении атомных ядер урана. По мере работы атомного реактора в нем накапливаются радиоактивные изотопы. Надо иметь в виду, что среди «осколочных» изотопов большинство короткоживущих, но среди них есть и долгоживущие, которые скапливаются внутри урановых стержней, если реактор гетерогенный.

При химической переработке урановых стержней, отработавших в атомном реакторе, образуются рабочие растворы, содержащие радиоактивные изотопы. В настоящее время эти рабочие растворы, как это делают в США, в бочках вывозят далеко в океан и выбрасывают. В Англии эти рабочие растворы по трубам спускают в Северное море на расстояние 3 км от берега. Однако этот путь уничтожения растворов весьма нецелесообразен, из-за накопления радиоактивности в морях и океанах.

В настоящее время перед учеными стоит большая задача разработки целесообразного использования или разумного уничтожения рабочих растворов. В качестве одной из наиболее удобных форм уничтожения этих растворов часто указывают на закапывание их в цементных бочках на большую глубину от поверхности земли. Сказанное здесь лишний раз свидетельствует о том, что бурное развитие использования ядерной энергии влечет за собой ряд важных вопросов, имеющих большое мировое значение.

Женевская конференция по мирному использованию атомной энергии (1955 г.) уделила большое внимание вопросам защиты от радиоактивного излучения. Ученые подчеркнули, что только проведение в этой области общегосударственных мероприятий через ООН и создание координационного центра межконтинентального значения может обеспечить полную безопасность людей, работающих на атомных установках, а также мирного населения.

Следует особо отметить, что в области охраны труда и защиты рабочих от воздействия радиоактивного излучения Советский Союз занимает, бесспорно, первое место. Другие страны не знают еще таких масштабов работы по защите от ионизирующего излучения, как в СССР. Применяемая в нашей стране система профилактических мероприятий надежно обеспечивает сохранение здоровья всех работающих в области мирного использования атомной энергии.

Использование атомной энергии, постройка различных атомных двигателей и установок, работающих на основе энергии атомных ядер, кроме решения теоретических, чисто научных проблем, требует решения сложных технических и

конструкторских задач. Для использования атомной энергии требуются новые металлы и сплавы, способные работать в условиях очень высоких температур, выдерживать сильное радиоактивное облучение, требуются материалы, обладающие способностью быстро отдавать теплоту в окружающее пространство. Использование атомной энергии, создание атомных двигателей требует также разработки новых методов автоматического и телемеханического управления, нужно разработать совершенные методы защиты людей и аппаратуры от радиоактивных излучений. Уровень современной науки сейчас уже достаточно высок для того, чтобы все эти задачи были успешно решены.

Перспектива широкого практического использования атомной энергии в мирных целях заставляет обратить особое внимание на проблемы поисков, добычи и переработки ядерного «горючего» урановых и ториевых руд. В земной коре содержатся миллионы тонн урана, но основная часть урана малодоступна для добычи. Уран встречается в различных горных породах, известняках, песках, в морской воде, но в очень малой концентрации. Между тем получать уран выгодно лишь из руд, в которых его содержится по крайней мере сотые доли процента. Поэтому от создания наиболее совершенных и точных методов разведки этих руд также зависит успешное развитие атомной техники.

В печати подробно обсуждаются различные методы изыскания урановых и ториевых месторождений. Например, хорошие результаты дал метод разведки радиоактивных руд с помощью специальных приборов, устанавливаемых на самолетах. Эти приборы точно регистрируют радиоак-

тивность определенных участков разведываемой местности. Аэrorадиометрический метод разведки применяется в СССР, США и в Канаде. С помощью этого метода советские геологи открыли в СССР ряд крупных месторождений урановых и ториевых руд, имеющих большое промышленное значение.

Имеются и другие методы, например, метод геологической разведки радиоактивных руд. Уран и продукты его распада — радий и радон — способны растворяться в природных водах и перемешиваться вместе с ними. Изучая радиоактивность этих вод, можно установить присутствие в них урановых элементов. Этот так называемый радиогидрогеологический метод нахождения урана и продуктов его распада все шире применяется в нашей стране. Имеются и другие способы разведки и добычи сырья для ядерных реакторов.

Следует иметь в виду, что производство чистого урана — весьма сложный процесс и требует разработки эффективных методов переработки урановых руд. На специальных заводах от урановой руды отделяется пустая порода. Очень ответственной операцией в технологии получения урана является очистка его от различных примесей. Известно, что многие примеси, находящиеся в урановой руде, поглощают нейтроны, что тормозит цепную ядерную реакцию. Такими примесями являются, например, кадмий и бор. Ученые стремятся создать такую технологию производства чистого урана, при которой в тонне ядерного «горючего» было бы не более одного грамма бора и кадмия.

В топливных элементах, приготовленных из природного урана, содержится 0,7% легкого изотопа — урана 235, а остальные 99,3% — уран 238.

Часто в атомных котлах применяется уран, обогащенный изотопом 235. Чем выше степень обогащения урана, тем больше производительность реактора.

Ученые усиленно работают над созданием наиболее простой и эффективной технологии обогащения урана. Основная трудность заключается в том, что обычные методы разделения, используемые в различных химических производствах, здесь совершенно неприменимы, так как по своим химическим свойствам уран 235 фактически не отличается от урана 238. Для разделения этих изотопов были разработаны особые методы.

Большое значение в атомной технике придается увеличению производства плутония и урана 233, о которых мы уже говорили. Важной задачей является также совершенствование методов получения изотопов водорода — дейтерия и трития, являющихся «горючим» для термоядерных реакций. Дейтерий, входящий в состав тяжелой воды, получается путем электролиза или фракционной перегонки обыкновенной воды. Тритий получают путем облучения нейтронами элемента лития. Этот процесс может быть осуществлен в атомных реакторах, где, как известно, создаются большие потоки нейтронов.

Вполне понятно, что наука еще не решила всех вопросов использования атомной энергии. Важнейшей научно-технической задачей является изыскание новых, более простых и вместе с тем более эффективных методов производства расщепляющихся материалов. Ведь в природе содержатся колоссальные запасы «горючего» для ядерных реакций. Возможности в этой области весьма велики.

В природных запасах урана и тория содер-

жится столько энергии, что ее использование известными уже путями может дать примерно в 20 раз больше энергии, чем использование энергии известных запасов угля и нефти. Поэтому разработка энергетических установок за счет ядерной энергии урана и тория является не только весьма актуальной, но и безусловно перспективной.

Человечество вступило в атомный век. XX век часто называют атомным веком, желая этим подчеркнуть, что на смену эпохи энергии угля и нефти пришло время использования энергии атомных ядер.

Теоретические и экспериментальные работы по атомной и ядерной физике привели в последние годы к поискам новых путей использования атомной энергии в мирных целях.

Выше рассматривался вопрос о мирном использовании ядерной энергии с энергетической целью, то есть ядерная энергия рассматривалась как источник энергии для получения, например, электрической энергии; этот вопрос был затронут в свете использования цепной реакции деления атомных ядер урана или тория. В последнее время весьма часто обсуждается проблема использования ядерной энергии с помощью термоядерных реакций, где энергия, скрытая в атомном ядре, выделяется не за счет расщепления тяжелых атомных ядер урана или тория, а в результате синтеза, слияния легких ядер таких веществ, как дейтерий или тритий, являющихся изотопами водорода. Как мы указывали, дейтерий встречается в природе и может быть выделен в больших количествах из воды путем электролиза. Тритий — радиоактивное вещество, которое можно получать в атомных котлах, бом-

бардируя нейтронами литий. Мы умеем сейчас в водородной бомбе создавать условия для превращения дейтерия и трития в гелий. Это и есть термоядерная реакция.

Использование термоядерных реакций с целью осуществления взрыва нашло уже техническое оформление в виде разного калибра водородных бомб. Взрывы этих бомб в сущности означают возможность выделения энергии за счет термоядерных реакций, протекаемых неконтролируемым и нерегулируемым образом. Естественно, встал вопрос о том, каким образом осуществить выделение энергии за счет термоядерных реакций не в форме мощного разрушительного взрыва, а постепенно, т. е. управляемым, регулируемым, а значит контролируемым образом.

Разрешение этой задачи сняло бы с человечества постоянную, жизненную заботу о запасах энергии, необходимой для существования на земле. Водород воды, как источник горючего, притом горючего в миллионы раз более концентрированного, чем уголь, имеет большое будущее.

Академик И. В. Курчатов, бывший в 1956 году в Англии совместно с Н. С. Хрущевым и Н. А. Булганиным, доложил в Харуэлле — научном английском центре об исследовательских работах по практическому использованию ядерной энергии, и о некоторых исследованиях советских ученых по управляемым термоядерным реакциям, которые ведутся под руководством академика Л. А. Арцимовича. Руководящая роль в разработке теоретических вопросов, связанных с этими исследованиями, принадлежит академику М. А. Леонтовичу.

Известно, что термоядерные реакции могут возникнуть только в том случае, если температура вещества настолько велика, что при столкновении ядер, в результате их теплового движения, имеется возможность преодоления мощных электрических сил отталкивания, существующих между ядрами. Особенно большой интерес представляет возбуждение термоядерных реакций в дейтерии или в смеси дейтерия и трития. В этом случае для получения заметного эффекта требуется более низкая температура, чем при использовании других веществ. Однако и в этом наиболее благоприятном случае, чтобы приблизиться хотя бы к порогу термоядерных реакций, мы должны поднять температуру вещества до нескольких миллионов градусов. При таких температурах дейтерий может существовать лишь в форме плазмы — среды, состоящей из электронов и голых атомных ядер, лишенных электронных оболочек.

Академик Курчатов И. В. далее указывал, что «Запас энергии, который должен быть сосредоточен в плазме, чтобы ее температура поднялась до значений, при которых термоядерные реакции станут достаточно интенсивными, относительно невелик. При температуре в миллион градусов тепловая энергия, аккумулированная в одном грамме дейтерия, составляет всего лишь несколько киловатт-часов. Поэтому, если изобрести такой метод нагревания плазмы, который обеспечит сохранение накопленной тепловой энергии, то можно вызвать возникновение интенсивных термоядерных реакций. Главная трудность, однако, именно в том и состоит, чтобы исключить тепловые потери, которые уже при температуре в несколько десятков тысяч градусов становятся на-

столько большими, что при отсутствии теплоизоляции дальнейшее повышение температуры оказывается практически невозможным.

При нагревании вещества с большой плотностью появляется еще одно серьезное препятствие: нужно как-то преодолеть огромные механические силы, которые возникают из-за повышения давления с температурой. Пытаясь нагреть твердый или жидкий дейтерий, мы обнаруживаем, что уже при ста тысячах градусов давление превышает миллион атмосфер. Поэтому в веществе с большой плотностью термоядерную реакцию можно возбудить только на очень короткий промежуток времени, и такой процесс будет иметь характер кратковременной пульсации или слабого взрыва. Это заставляет проводить эксперименты на газообразном дейтерии.

Как же, однако, добиться того, чтобы при нагревании дейтерия его частицы, приобретая большие скорости, не разбегались во все стороны, унося тепловую энергию на стенки сосуда, внутри которого они заключены? Нужно придумать такой опыт, который позволит удерживать частицы в плазме, т. е. лишить их возможности передавать тепло стенкам.

Одна из идей, возникающая в связи с этим вопросом, заключается в том, чтобы использовать для термозащиты плазмы магнитное поле. Впервые на это указали в 1950 году молодой физик, ныне академик А. Д. Сахаров и академик И. Е. Тамм. Советские ученые показали, что магнитное поле может играть роль «незримой стены», ограничивающей плазму и создающей тепловую изоляцию. Дело в том, что магнитное поле кардинальным образом изменяет характер движения заряженных частиц, т. е. электронов и

ядер в плазме. Они перестают метаться по прямолинейным траекториям и начинают двигаться по спиралью малого радиуса. Применяя грубый образ, можно сказать, что они оказываются пленными в плазме, как белка в колесе. Потеряв свободу своего движения, частица при наличии магнитного поля уже не может унести энергию из плазмы.

Магнитное поле, необходимое для термозащиты, можно создать, пропуская через разреженный газ электрический ток достаточной величины — в несколько сотен тысяч ампер. Если создать в газе такой электрический разряд, более мощный, чем любой удар молнии, то на основании теоретических соображений можно ожидать, что вещество в разрядной камере за миллионные доли секунды сожмется в тонкий плазменный шнур, оторванный от стенок камеры, и нагреется до очень высокой температуры. Если такой разряд происходит в дейтерии, то при достаточной большой силе тока должно наблюдаться испускание нейтронов, рождающихся в результате термоядерной реакции.

На основе этих соображений советскими физиками были поставлены опыты по изучению мощных электрических разрядов в газах. В этих опытах исследовались явления, возникающие при прохождении больших токов через водород, дейтерий и другие газы, при различных степенях разрежения газа. Максимальная сила тока достигала двух миллионов ампер, а мгновенная мощность, выделявшаяся при таких кратковременных разрядах в некоторых из экспериментов, более чем в 10 раз превосходила мощность Куйбышевской электростанции. Однако для проведения таких опытов недостаточно обладать уста-

новками, позволяющими сосредоточивать в разрядной камере на короткий промежуток времени такую огромную мощность. Необходимо также обладать весьма совершенной и разнообразной аппаратурой, с помощью которой можно зарегистрировать развитие процессов в плазме длительностью в несколько миллионных долей секунды. Быстродействующие осциллографы, сверхскоростная киносъемка, фотоаппараты с затворами электронного действия, электронные умножители — весь этот сложный арсенал современной экспериментальной физики был использован для изучения свойств плазмы, нагреваемой мгновенным импульсом тока».

«Опыты показали, что, пропуская ток силой в несколько сотен тысяч ампер через разреженный газ, действительно можно нагреть образующийся плазменный шнур до температуры порядка миллиона градусов. Такую температуру в лабораторных условиях ранее никому не удавалось получить. Только в водородной бомбе достигается более высокая температура. Однако в этом случае наблюдатель не рискнет приблизиться к месту взрыва на расстояние меньше, чем в несколько километров. В опытах, о которых идет речь, тонкая струйка раскаленной плазмы, заключенная внутри разрядной камеры, безопасна для окружающих, так как содержит небольшое количество вещества.

Не менее интересным результатом этих исследований является то, что они привели в 1952 году к открытию испускания нейтронов и рентгеновых лучей с большой проникающей способностью. Правда, нейтронное испускание в этом случае нельзя рассматривать как результат термоядерной реакции, так как оно, по-видимому, в основ-

ном обусловлено какими-то новыми, ранее не известными процессами в плазме. Оказалось, что явления, разыгрывающиеся в плазме, несравненно сложнее той упрощенной картины, которая была создана в первоначальных теоретических построениях.

Полученные экспериментальные факты опрокинули многие привычные представления о свойствах плазмы, укоренившиеся в результате многолетних исследований газовых разрядов в обычных условиях. Плазма в разрядной камере испытывает ряд быстрых, следующих друг за другом сжатий и расширений. Во время этих сжатий и расширений вещество то сбегается к центру разрядной камеры, то расходится к стенкам с огромными скоростями, достигающими 100 километров в секунду. При этом на короткое время в плазме создаются очень большие электрические перенапряжения, которые, быть может, и являются одной из основных причин, вызывающих появление нейтронов и проникающего рентгеновского излучения.

Только дальнейшие исследования смогут дать ответ на вопрос, удастся ли, идя по этому пути, подойти к созданию регулируемой термоядерной реакции большой интенсивности. Вместе с тем следует тщательно изучить и другие направления в решении этой основной задачи. В частности, значительный интерес представляет изучение вопроса о возможности получения термоядерной реакции при непрерывно протекающих процессах большой длительности».

Это сообщение академика И. В. Курчатова свидетельствует о больших достижениях советских ученых. Таким образом, есть основания ожидать развития новых путей использования

ядерной энергии в мирных целях с помощью термоядерных реакций.

Открытие путей практического использования ядерной энергии открывает новую эру в истории техники и науки, и советские ученые вписали в эту историю много славных страниц.





СПИСОК

КНИГ ДЛЯ ОЗНАКОМЛЕНИЯ С УЧЕНИЕМ
О ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГИИ И ПУТЯХ ЕЕ МИРНОГО
ИСПОЛЬЗОВАНИЯ

1. Френкель Я. И. Принципы теории атомных ядер. Издательство Академии наук СССР, 1950 г.
2. Рицлер В. Введение в ядерную физику. Издательство иностранной литературы, 1948 г.
3. Семат Г. Введение в атомную физику. Издательство иностранной литературы, 1948 г.
4. Корсунский М. И. Атомное ядро. Гостехиздат, 1952 г.
5. Гейзенберг В. Физика атомного ядра. Гостехиздат, 1947 г.
6. Ферми Э. Молекулы и кристаллы. Издательство иностранной литературы, 1946 г.
7. Лэпп Р. Е. Новая сила. Об атомах и людях. Издательство иностранной литературы, 1954 г.
8. Лэпп Р. Е. и Эндрюс Г. Л. Физика ядерного излучения. Воениздат, 1956 г.
9. Намнас М. Ядерная энергия. Издательство иностранной литературы, 1955 г.
10. Аглинцев К. К. Дозиметрия ионизирующих излучений. Гостехиздат, 1950 г.
11. Кюри М. Радиоактивность. Гостехиздат, 1947 г.
12. Бреслер С. Е. Радиоактивные элементы. Гостехиздат, 1952 г.
13. Поллард Э. и Дэвидсон В. Прикладная ядерная физика. Гостехиздат, 1947 г.
14. Добротин Н. А. Космические лучи. Гостехиздат, 1954 г.
15. Атомное оружие. Сборник статей. Воениздат, 1955 г.

16. Валь А., Боннер Н. Использование радиоактивности при химических исследованиях. Издательство иностранной литературы, 1954 г.
17. Камен М. Радиоактивные индикаторы в биологии. Издательство иностранной литературы, 1948 г.
18. Проблемы использования атомной энергии. Сборник статей. Воениздат, 1956 г.
19. Аглинцев К. К. Основы дозиметрии ионизирующих излучений. Медгиз, 1955 г.
20. Кронгауз А. Н. Дозиметры для рентгеновских и гамма-лучей. Медгиз, 1953 г.
21. Жено П. Защита от радиоактивных элементов. Издательство иностранной литературы, 1954 г.
22. Бочкарев В. и др. Измерение активности источников бета- и гамма-излучений. Издательство Академии наук СССР, 1953 г.
23. Сессия Академии наук СССР по мирному использованию атомной энергии. Пять сборников докладов. Издательство Академии наук СССР, 1955 г.
24. Баранов В. И. Радиометрия. Издательство Академии наук СССР, 1955 г.
25. Доклады иностранных ученых на международной конференции по использованию атомной энергии.
 - а) Химия ядерного горючего.
 - б) Металлургия ядерной энергетики и действие облучения на материалы.
 - в) Экспериментальные реакторы и физика реакторов.
 - г) Атомная энергетика.
 - д) Геология атомных сырьевых материалов.
 - е) Применение радиоактивных изотопов.
 - ж) Дозиметрия ионизирующих излучений.
26. Гольдманский В. И. Новые элементы в периодической системе Д. И. Менделеева. Изд. 2-е, переработанное и дополненное. Гостехиздат, 1955 г.
27. Ландау Л. Д. и Смородинский Я. А. Лекции по теории атомного ядра. Гостехиздат, 1955 г.
28. Муриш А. Н. Введение в радиоактивность. Издательство Ленинградского университета, 1955 г.
29. Экспериментальная ядерная физика. Под редакцией Серге. Перевод с английского. Издательство иностранной литературы, 1955 г., т. I и 1956 г., т. II.
30. Актиниды. Под редакцией Г. Сиборга и Дж. Каца. Перевод с английского. Издательство иностранной литературы, 1955 г.



ОГЛАВЛЕНИЕ

	Стр.
Введение	3
1. Материя и энергия	12
2. Основные законы естествознания	15
Единица измерения механической энергии —	20
эрг	21
Единица измерения энергии, применяемая	21
в атомной физике, — мегаэлектронвольт	22
Единица измерения энергии, применяемая	22
для измерения энергии тел, — калория	22
3. Количество энергии в том или ином теле	—
и понятие атомная энергия	30
4. Вещество и его молекулярная природа	30
5. Атомное строение вещества, химический эле-	35
мент	39
6. Планетное строение атома	45
7. Атомное ядро и его свойства	52
8. Состав атомных ядер	55
9. Изотопы	63
10. Природа сил в атомном ядре	63
11. Энергия связи в атомных ядрах; физическая	67
сущность понятия выделение энергии и пути	85
практического использования ядерной энергии	90
12. Устойчивые и неустойчивые атомные ядра	90
13. Виды радиоактивных превращений	146
14. Цепная реакция деления как путь практиче-	158
ского использования ядерной энергии	158
15. Критическая масса	169
16. Принципиальная схема устройства атомной	175
бомбы	175
17. Эффект взрыва атомной бомбы	185
18. Атомный реактор как источник получения плу-	185
тония 239	185
19. Самовоспроизводящий (бридерный) и силовой	206
атомные реакторы	215
20. О термоядерных реакциях и водородной бомбе	231
21. Атомную энергию на службу человеку	231
Список книг для ознакомления с учением о ядер-	278
ной энергии и путях ее мирного использования	278