

УДК 539.17

**ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕТОДОВ ОСВОЕНИЯ  
ЭНЕРГИИ ЯДРА: ЦЕПНЫЕ РЕАКЦИИ ДЕЛЕНИЯ  
ТЯЖЕЛЫХ ЯДЕР**

*Н. И. Тарантин*

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

ВВЕДЕНИЕ	1445
АТОМНАЯ И ЯДЕРНАЯ ЭНЕРГИИ	1448
ЭКВИВАЛЕНТНОСТЬ ЭНЕРГИИ И МАССЫ	1449
УПАКОВОЧНОЕ ОТНОШЕНИЕ НУКЛОНОВ В АТОМНЫХ ЯДРАХ И МАСС-ДЕФЕКТ	1452
ОТКРЫТИЕ ДЕЛЕНИЯ ТЯЖЕЛЫХ ЯДЕР	1455
ВТОРИЧНЫЕ НЕЙТРОНЫ ПРИ ДЕЛЕНИИ ТЯЖЕЛЫХ ЯДЕР	1459
МОДЕЛЬ ДЕЛЕНИЯ ТЯЖЕЛЫХ ЯДЕР	1461
ОТКРЫТИЕ ПЛУТОНИЯ-239. УРАН-233	1476
ОСНОВЫ ТЕОРИИ ЦЕПНЫХ РЕАКЦИЙ ДЕЛЕНИЯ ТЯЖЕ- ЛЫХ ЯДЕР И ИХ ОСУЩЕСТВЛЕНИЕ	1477
ОБЩЕСТВЕННЫЕ ИНИЦИАТИВЫ УЧЕНЫХ-ЯДЕРЩИКОВ	1493
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	1499
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	1500

УДК 539.17

## ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕТОДОВ ОСВОЕНИЯ ЭНЕРГИИ ЯДРА: ЦЕПНЫЕ РЕАКЦИИ ДЕЛЕНИЯ ТЯЖЕЛЫХ ЯДЕР

*Н. И. Тарантин*

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

Рассматриваются физические основы использования энергии деления тяжелых ядер для энергетических целей. Подробно анализируется физический процесс деления ядер по первой модели, предложенной Н. Бором и Дж. Уилером. Приводятся последующие усовершенствования этой модели. Изложены основные положения теории управляемых цепных реакций ядерного деления в реакторах. Сложная история проблемы освоения ядерной энергии деления ядер излагается на основе как оригинальных научных публикаций, так и мемуарных сообщений, опубликованных в последующие годы.

Physical basics are considered of using the fission of heavy nuclei as a source of nuclear energy. A detailed analysis of nuclear fission is made in the framework of the first model proposed by N. Bohr and J. A. Wheeler. Further improvements to that model are presented. The basic principles are outlined of the theory of controlled nuclear fission chain reactions. The intricate history of solving the problem of the generation of nuclear energy from fission reactions is traced on the basis of both contemporary scientific publications and following memoirs.

*В память о Георгии Николаевиче Флерове*

### ВВЕДЕНИЕ

Энергия — основа основ человеческого существования. Чем шире и полнее человек пользуется ею, тем выше его материальное и духовное благополучие. Существование современного человека связано с обязательным потреблением значительных количеств различных видов энергии для производства продуктов питания и приготовления пищи, обогрева и освещения жилых и производственных помещений, выполнения механических работ, перемещения людей и грузов по суше и по воде, в атмосфере и в космосе, изготовления бытовых и производственных объектов и предметов пользования, удовлетворения духовных и эстетических потребностей. Итоговый расклад потребления энергии населением Российской Федерации состоит из следующих относительных затрат: 30–40 % от всей затрачиваемой энергии идет на теплообеспечение, 25–30 % потребляется в промышленности, 15–20 % — на

транспорте и 10–15 % — в сельском хозяйстве. В настоящее время человечество использует источники энергии общей мощностью порядка 10 ТВт. И эта потребляемая мощность непрерывно растет, удваиваясь каждые 20–30 лет.

В США потребление энергии характеризуется средней мощностью приблизительно 7,5 кВт на одного человека, в западной Европе — 5,0 кВт, в развивающихся странах на одного человека приходится менее 1 кВт мощности используемой энергии.

По данным РАО «ЕЭС России» в Российской Федерации на все потребности одного человека расходуется только электрической энергии 6 МВт · ч в год. Это значит, что электрическая мощность, приходящаяся в среднем на одного жителя России, составляет 0,7 кВт.

От рождения Христа до конца XX в. население Земли увеличилось в 100 раз, достигнув в конце прошлого века 6,5 млрд человек, и продолжало стремительно расти. В настоящее время как будто бы установилось относительное постоянство численности населения планеты приблизительно в 7 млрд человек при прогнозируемом темпе роста в будущем всего 0,5 % в год. Это следует из ряда научных прогнозов и, в частности, из доклада С. П. Капицы «Рост народонаселения Земли с точки зрения физика». В этом докладе, который С. П. Капица сделал 4 марта 2003 г. в ОИЯИ (г. Дубна) на семинаре по случаю 90-летия со дня рождения академика Георгия Николаевича Флерова, автор прогнозирует изменение численности населения Земли на основе математической модели развития человечества как саморазвивающейся, саморегулирующейся системы. Автором показано, что человечество сегодня живет в период мирового демографического перехода, который продлится около ста лет и характеризуется в начале периода резким увеличением скорости роста населения и затем стремительным ее падением в конце периода. После этого численность населения Земли стабилизируется и составит 10–12 млрд человек.

Если принять указанный выше темп роста населения Земли на ближайшие десятилетия 0,5 % в год и допустить, что уровень потребления населением энергии в среднем на планете поднимется хотя бы до современного европейского (5 кВт на одного человека), то при ожидаемой численности населения Земли к середине XXI в. около 10 млрд человек прогнозируемая мощность потребляемой человечеством энергии составит около 50 ТВт.

В связи с этим вполне естествен вопрос, каким образом можно будет удовлетворить в будущем эти возрастающие потребности человечества в энергии.

В общем потоке потребляемой человечеством энергии энергия неиссякаемых источников (неиссякаемых в масштабе времени существования Солнца и Луны), т. е. энергия солнечных лучей, рек и ветра, морских приливов и отливов, тепловая энергия недр Земли, и энергия ежегодно возобновляемых источников энергии — энергия биомассы растений, используемой в качестве топлива, в настоящее время составляет всего около 10 %, т. е. не является

сколько-нибудь существенной. И нет оснований ожидать большого увеличения потребления этого вида энергии.

Запасы ископаемого углеводородного топлива — каменного угля, нефти, природного газа и торфа — ограничены. Разведанное содержание в земной коре, например, самой большой составляющей углеводородного топлива — каменного угля, оценивается примерно в 500 млрд т. Запасов каменного угля и других видов используемого в настоящее время углеводородного топлива при мощности расхода энергии в середине XXI в. 50 ТВт хватит на несколько десятилетий.

Заметим, что углеводородные природные соединения являются ценнейшим сырьем для производства различных новых синтетических органических материалов, без которых сейчас и в будущем не обойтись. Поэтому здесь следует вспомнить слова Д. И. Менделеева о том, что сжигать нефть — это то же самое, что топить печь ассигнациями.

Ситуацию с ограниченностью запасов углеводородного топлива на Земле не улучшают и открытые в последние годы колоссальные массы метангидрата, эквивалентные по содержанию энергии разведанным запасам углеводородного топлива всех видов. Метангидрат представляет собой включения газа метана в большие массивы льда (32 молекулы воды и 8 молекул метана), расположенные на глубине 500–2000 м в океане под давлением 50–200 атм. Эти запасы метангидрата в настоящее время практически недоступны для применения в качестве топлива.

Парниковый эффект, обусловленный выбросом в атмосферу углекислого газа при сжигании углеводородного топлива, ведет к нежелательному глобальному потеплению климата на Земле и проявляется, например, в том, что уровень Мирового океана в результате таяния вечных ледников повышается, затапливая освоенную часть суши, возрастает повторяемость засух, усиливается разрушительная сила ураганов, а в земной атмосфере образуется переизбыток положительных ионов и недостаток отрицательных аэронов, что вредно отражается на состоянии здоровья людей.

Из сказанного выше следует, что должна быть альтернатива сжиганию углеводородного топлива. Этой альтернативой может быть использование внутренней энергии атомного ядра.

Целью настоящего обзора является рассмотрение физических основ метода получения ядерной энергии через деление тяжелых ядер. В обзоре подробно рассматривается физический процесс деления ядра по модели, разработанной Бором и Уилером, и дальнейшие ее усовершенствования. Рассматриваются основные положения теории управляемых цепных реакций ядерного деления, а также разветвляющихся неуправляемых реакций деления, происходящих в ядерных взрывах при испытаниях ядерного оружия и применявшихся в мирных целях в народном хозяйстве Советского Союза. Сложная история проблемы освоения ядерной энергии деления излагается на основе

как оригинальных научных публикаций, так и мемуарных сообщений, опубликованных в последующие годы.

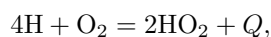
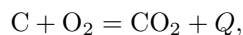
Известно, что работы по созданию ядерного оружия как в СССР, так за рубежом были строго засекречены. Это создавало почву для всякого рода фантазий вокруг проблемы использования ядерной энергии и ядерной бомбы в умах даже научной общественности. Здесь уместно привести воспоминания О. А. Лаврентьева [1], одного из зачинателей термоядерных изысканий в ядерной эпопее. На лекции по химии, как вспоминает о своих студенческих годах О. А. Лаврентьев, профессор МГУ Г. Д. Вовченко говорил, что «водородная бомба — это когда землю заливают жидким водородом, все замораживая». У меня вырвалось: «Какая чушь!». Этот эпизод автор приводит для того, чтобы показать степень неосведомленности даже в научных кругах о проблемах, секретные работы по которым шли уже полным ходом в СССР и США.

После подписания Президентом России Б. Н. Ельциным 17 февраля 1995 г. Указа «О подготовке и издании официального сборника архивных документов по истории создания ядерного оружия в СССР» появилось много публикаций в открытой печати бывших участников этого проекта. Эти материалы представляют большой интерес для более глубокого понимания вопросов разработки атомной проблемы и ее истории, развенчивают некоторые из существующих ядерных мифов. В настоящем обзоре освещается значительное число появившихся сравнительно недавно публикаций, с которыми широкий круг читателей еще не знаком.

## 1. АТОМНАЯ И ЯДЕРНАЯ ЭНЕРГИИ

Обычно в специальных и общих публикациях применяется термин «атомная энергия» и в том случае, когда речь идет об энергии, выделяемой непосредственно из ядра, т. е. о ядерной энергии. Ниже эти два термина не используются как синонимы.

**1.1. Энергия атома.** При сжигании углеводородного топлива происходят реакции окисления атомов углерода и водорода кислородом воздуха с образованием молекул углекислого газа и воды в качестве конечных продуктов горения:



где  $Q$  — выделяемая в результате реакции горения энергия, обусловленная более низким энергетическим положением валентных электронов в молекулах конечных продуктов реакции по сравнению с их положениями в исходных атомах. Эта энергия, например, при сжигании газа метана  $CH_4$  с обра-

зованием углекислого газа и воды как конечных продуктов реакции, равна  $Q = 7800$  ккал на один килограмм массы метана или  $32,5$  МДж/кг, что эквивалентно выделению  $Q = 5,4$  эВ на одну молекулу метана, или в среднем  $Q = 1,1$  эВ на один атом углерода или водорода створевшего вещества, или  $Q = 0,34$  эВ на единицу массы молекулы метана. Такой масштаб энерговыделения в химических реакциях определяется изменением энергии электрического и магнитного взаимодействий отрицательно заряженных электронов с положительно заряженными атомными ядрами.

**1.2. Энергия ядра.** О ядерной энергии впервые заговорили после открытия в 1896 г. французским ученым Беккерелем нового явления — естественной радиоактивности. Это, в свою очередь, дало повод полагать, что в ядре сосредоточена куда большая энергия, чем энергия, заключенная в электронной оболочке атома, о чем говорили и непосредственные калориметрические измерения тепла, выделяемого при радиоактивном распаде тяжелых ядер. В этом случае мера энергии, заключенной внутри ядра и выделяющейся в результате ядерного превращения, выражалась уже в миллионах эВ.

В связи с этим выдающийся ученый академик В. И. Вернадский, один из первых в России понявший значение ядерного радиоактивного распада, на заседании Российской академии наук в 1910 г. говорил: «Теперь перед нами открываются в явлениях радиоактивности источники атомной (читай «ядерной» — *Н. Т.*) энергии, в миллионы раз превышающие те источники сил, которые рисовались в человеческом воображении. . . » [2]. Но уже тогда было видно, что ядерная энергия глубоко спрятана в ядре и не ясно, каким способом и какой ценой она может быть извлечена оттуда и как использована человечеством.

## 2. ЭКВИВАЛЕНТНОСТЬ ЭНЕРГИИ И МАССЫ

Ответ на вопрос о возможности получения энергии из массы вещества следует из законов движения механики в специальной теории относительности (СТО), изложенной в окончательном виде Эйнштейном в 1905–1908 гг. Ниже дается краткое содержание СТО на основе сборника статей [3], составленного А. А. Тяпкиным. Этот сборник содержит оригинальные, опубликованные в прошлом работы корифеев СТО Минковского, Лармора, Пуанкаре, Лоренца, Эйнштейна и направлен на то, чтобы более полно представить роль каждого из них в создании и становлении СТО.

Волновая теория света, сложившаяся ко второй половине XIX в., привела к представлению о некоей эфемерной мировой среде — эфире. Это представление повлекло за собой постановку опытов о свойствах эфира и его роли в распространении света при движении прозрачной материальной среды. Опыт Физо (1851 г.) должен был выявить связь движения прозрачного тела с

эфиром, заполняющим это тело. Выяснилось, что предполагаемый эфир частично увлекается движущимся прозрачным веществом, в частности, текущей водой.

Казалось естественным, продолжая изучение свойств эфира, определить связь движения Земли с эфиром. Такой опыт был осуществлен Майкельсоном в 1881 г. Выяснилось, что эфир или полностью увлекается движущейся вместе с Землей ее атмосферой, или представление об эфире, как о среде абсолютно неподвижной, несправедливо.

Фитцджеральд объяснил отрицательный результат опытов Майкельсона (отсутствие проявления абсолютного движения) предположением, что при движении тела его размеры в направлении движения уменьшаются так, чтобы скомпенсировать изменение скорости света в силу сложения скоростей.

В конце XIX в. Лоренц построил теорию электрона, согласно которой электрон при движении сокращается в направлении движения [4], а его масса увеличивается. Далее он предположил, что и все тела при движении сжимаются [5]. Более того, он ввел понятие местного времени, в результате чего объяснил отсутствие наблюдения абсолютного движения Земли в опытах Майкельсона. Поэтому пришлось отказаться от двух основных постулатов классической физики и полагать, что при движении длина линейки сокращается в направлении движения:  $l_1 = l(1 - \beta^2)^{1/2}$ ,  $x_1 = (x - vt)/(1 - \beta^2)^{1/2}$ ,  $y_1 = y$ ,  $z_1 = z$ , а ход часов замедляется в  $1/(1 - \beta^2)^{1/2}$  раз, где  $\beta = v/c < 1$ ,  $v$  — скорость движущегося тела, индексом 1 отмечены координаты в движущейся со скоростью  $v$  относительно наблюдателя системе координат.

За большой вклад в развитие идей об уменьшении размеров тел в направлении их движения и понятии местного времени, не совпадающего с временем в другом месте, Лоренц был удостоен совместно с Зеemanом Нобелевской премии 1902 г. (Здесь и ниже сведения о присуждении Нобелевских премий в области физики взяты в основном из книги [6].)

Однако многие ученые расценили в то время объяснения Лоренца как далеко не обоснованные. В частности, Пуанкаре в своей статье «Настоящее и будущее математической физики» [7] назвал эти предположения Лоренца *coup de pouce*, что в переводе с французского означает «ухищрение» и что воспринималось, в лучшем случае, как искусственный, не имеющий физического смысла математический прием. Однако в замечаниях Пуанкаре, опубликованных в 1905 г., наряду с критикой были даны и пророческие прогнозы. Так, в его статье [7, с. 38] читаем: «На основе всех этих результатов, если они подтвердятся, возникла бы совершенно новая механика, которая характеризовалась бы главным образом тем фактом, что никакая скорость не могла бы превышать скорости света, . . . поскольку тела противопоставляли бы возрастающую инерцию силам, стремящимся ускорить их движение, и эта инерция становилась бы бесконечной при приближении к скорости света». И эта новая механика была создана.

В 1905–1908 гг. Эйнштейн разработал СТО, в которой дал совершенно неожиданные ответы на все возникшие вопросы, связанные с эфиром и абсолютным движением. Основные положения СТО изложены в его статье «К электродинамике движущегося тела», опубликованной в 1905 г. [8].

Эйнштейном были приняты два положения: 1) не существует какой-либо «абсолютной» системы отсчета движения тел, т. е. все движения относительны; 2) скорость света в пустоте в различных системах отсчета, движущихся равномерно и прямолинейно по отношению друг к другу, имеет одно и то же численное значение, или скорость света не зависит ни от движения источника света, ни от движения наблюдателя.

Таким образом, в СТО была впервые отчетливо постулирована та особая роль скорости света, которую в физике вообще и в механике в частности она играет.

В механике Ньютона масса тела  $m$  считается величиной постоянной, не зависящей от скорости. Это предположение несовместимо с требованием инвариантности уравнений движения по отношению к преобразованиям Лоренца. Чтобы сохранить массу тела как скалярную величину, т. е. как величину, единообразно учитываемую при рассмотрении динамики массы как вдоль, так и поперек перемещения тела, пришлось принять допущение, что масса тела зависит от его скорости:

$$m = \gamma m_0 = m_0 / (1 - \beta^2)^{1/2}, \quad (1)$$

где  $m$  — динамическая масса тела;  $m_0$  — его масса покоя.

Закон движения тела в механике СТО, учитывающий зависимость массы от скорости, получил следующее неформальное выражение:

$$d(m\mathbf{v})/dt = \mathbf{F}, \quad (2)$$

где  $\mathbf{F}$  — действующая на тело сила. Заметим, что в такой же релятивистской форме этот закон как второе начало механики был записан в классических «Началах» Ньютона в конце XVII в. на основе экспериментов по движению тел только при малых скоростях (в нерелятивистской форме выражение (2) имеет вид  $m d\mathbf{v}/dt = \mathbf{F}$ ).

В механике СТО, как и в классической механике, кинетическая энергия движущегося тела определяется той работой, которую производит внешняя сила, чтобы сообщить телу скорость. Элементарная работа силы  $dA$  при перемещении  $d\mathbf{r}$  определяется формулой

$$dA = \mathbf{F}d\mathbf{r} = \mathbf{F}dtd\mathbf{r}/dt = \mathbf{F}\mathbf{v}dt. \quad (3)$$

Эта элементарная работа равна увеличению кинетической энергии тела на  $dE$ . Если в (3) вместо  $\mathbf{F}dt$  подставить равную ей согласно закону движения (2)



величину  $d(m\mathbf{v})$ , то для приращения кинетической энергии движущегося тела получим

$$dT = [d(m\mathbf{v})]\mathbf{v} = mvdv + v^2 dm. \quad (4)$$

Используя выражение (1) для массы движущегося тела и формулу (4) для кинетической энергии, приходим к

$$dT = m_0 v dv / c^2 + m_0 v^3 dv / c^2 (1 - \beta^2)^{3/2} = m_0 v dv / (1 - \beta^2)^{1/2}. \quad (5)$$

Из сопоставления выражения (5) и дифференциала динамической массы (1)  $dm/dv = m_0 v / c^2 (1 - \beta^2)^{1/2}$  следует, что

$$dT = c^2 dm, \quad (6)$$

т. е. кинетическая энергия движущегося тела обладает динамической массой  $dm$ , дополнительной к массе покоя тела  $m_0$ .

Это утверждение было получено в рамках механики СТО. Однако Эйнштейн пошел дальше и предположил, что не только кинетическая, но и любая другая энергия обладает массой, и наоборот, масса тела при соответствующих условиях может быть преобразована в энергию, при этом выполняется количественное соотношение между энергией и массой, адекватное дифференциальному соотношению (6):

$$E = mc^2. \quad (7)$$

В 1921 г. Эйнштейн был удостоен Нобелевской премии «за вклад в теоретическую физику, особенно за открытие закона фотоэлектрического эффекта».

### 3. УПАКОВОЧНОЕ ОТНОШЕНИЕ НУКЛОНОВ В АТОМНЫХ ЯДРАХ И МАСС-ДЕФЕКТ

Согласно планетарной модели атома, разработанной на основе экспериментов по кулоновскому рассеянию  $\alpha$ -частиц Резерфордом, получившим в 1908 г. Нобелевскую премию по химии «за исследования в области распада элементов и химии радиоактивных веществ», масса атома практически сосредоточена в его ядре, содержащем  $Z$  протонов и, как теперь известно,  $N$  нейтронов, и в очень малой доле — в электронах, планетарно расположенных вокруг ядра с общим числом  $Z$ . В многочисленных измерениях масс атомов изотопов различных элементов, проведенных в начале прошлого века Астоном (среди 273 природных нуклидов Астон в течение двух десятилетий обнаружил 212 изотопов известных химических элементов), было показано, что массы нуклидов  $M(A, Z)$ , выраженные тогда в так называемой физической кислородной шкале атомных масс, в которой за единицу атомной массы

была принята 1/16 доля массы атома изотопа кислорода  $^{16}\text{O}$ , можно представить в виде

$$M(A, Z) = A + \Delta(Z, N), \quad (8)$$

где  $A$  — целочисленная часть значения массы нуклида;  $\Delta(Z, N)$  — небольшая по сравнению с единицей (меньше 0,1) величина, которая может иметь как положительные (избыток массы), так и отрицательные (недостаток массы) значения [9].

Напомним также, что Нобелевская премия по химии, которой был удостоен Астон в 1922 г., была присуждена ему «за открытие с помощью сконструированного масс-спектрографа большого числа изотопов нерадиоактивных элементов и за открытие закона целых чисел», представленного соотношением (8).

Наиболее интересным результатом определения понятий избытка или недостатка массы (8) явился анализ зависимости этих величин от массового числа нуклидов  $A$ , сделанный Астоном. Автор [9] ввел отношение

$$P(Z, N) = \Delta(Z, N)/A, \quad (9)$$

которое графически представлено на рис. 1 в зависимости от массового числа  $A$ . Величина (9) была названа Астоном упаковочной дробью или упаковочным отношением (packing fraction), но в литературе на русском языке ее называют упаковочным множителем.

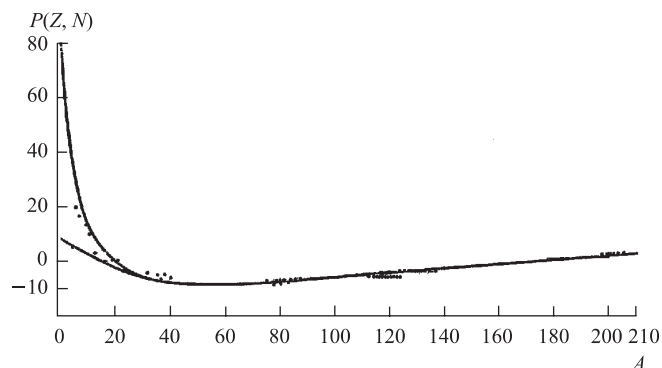


Рис. 1. Зависимость упаковочного отношения  $P(Z, N)$  от массового числа нуклида  $A$  [10]

Кривая на рис. 1 продемонстрировала, по мнению автора [10], в высшей степени интересную в то время закономерность, показывающую пути возможного овладения ядерной энергией. Кривая начинается с больших значений упаковочного отношения для легких ядер, затем снижается, выходя на

плато в районе массовых чисел  $A = 40-80$ , а затем возрастает в области совсем тяжелых нуклидов.

Согласно приведенной выше формуле (7) такое поведение масс нуклидов в зависимости от массового числа указывает на следующие возможные пути извлечения ядерной энергии. В области легких нуклидов — это экзоэнергетические реакции слияния совсем легких ядер (ядер изотопов водорода, лития, бериллия и других) в более упакованные нуклиды. В области тяжелых ядер возможны сопровождаемые выделением ядерной энергии радиоактивные  $\alpha$ - и  $\beta$ -превращения совсем тяжелых ядер в менее тяжелые. Во времена первого издания книги Астона [9] другие экзоэнергетические процессы — ни вынужденное, ни спонтанное деление тяжелых ядер — не были известны.

Уменьшение массы вещества в результате ядерного превращения нуклидов Астон назвал дефектом массы.

Как впервые (в 1920 г.) показал астроном Эддингтон, ядерные реакции слияния легких ядер протекают в глубоких недрах Солнца и некоторых звезд при температуре до 20 млн градусов и являются источником излучаемой ими световой энергии. Внутри Солнца и звезд такой экзоэнергетической реакцией является реакция образования ядер  ${}^4\text{He}$  в результате слияния четырех протонов, имеющих в сумме большую массу, чем масса ядра  ${}^4\text{He}$ . Эта реакция протекает двумя путями: 1) начальная реакция слияния двух ядер протия в ядро дейтерия с испусканием позитрона  ${}^1\text{H} + {}^1\text{H} = \text{D} + \beta^+$  и в дальнейшем — слияния протия с образовавшимися ядрами дейтерия и трития, 2) так называемый углеродно-азотный цикл.

В рассмотренном случае, согласно данным одной из последних сводных таблиц масс ядер [10], дефект массы покоя участников процесса слияния четырех ядер  ${}^1\text{H}$  в одно ядро  ${}^4\text{He}$  эквивалентен ядерной энергии  $Q = \delta m_0/c^2 = 29,2$  МэВ или 7,3 МэВ на единицу суммы массовых чисел исходных участников цикла. Соотношение между атомной единицей массы (а. е. м.) в новой международной системе единиц СИ и эквивалентной ей энергией следующее:  $1 \text{ а. е. м.} = 1,6605 \cdot 10^{-27} \text{ кг} = (931493,86 \pm 0,07) \text{ кэВ}/c^2$ .

После открытия предсказанного Джозефсоном эффекта сверхпроводящего туннелирования электронных пар через диэлектрик, разделяющий два сверхпроводника, было решено использовать этот эффект для более точного воспроизведения и поддержания эталона электрического напряжения. Не останавливаясь на деталях эффекта Джозефсона, отметим только, что под действием постоянной разности электрических потенциалов, приложенных к сверхпроводникам ячейки Джозефсона, через диэлектрик течет переменный ток электронных пар с частотой

$$f = 2q_0V/h, \quad (10)$$

где  $h$  — постоянная Планка. Поскольку измерение частоты может быть проведено с очень высокой точностью, то в качестве эталона электрического

напряжения было решено выбрать ячейку Джозефсона с определенной частотой электромагнитного излучения. Такая эталонная ячейка постепенно формировалась как стандарт единицы напряжения начиная с 1972 г. Небольшие различия энергетического эквивалента последних лет (с 1972 по 1990 г.), имевшие место в связи с уточнением значений принимаемого коэффициента пропорциональности между частотой и напряжением в формуле (10), существенны только при пересчете массы в энергию, и наоборот, если требуется относительная точность лучше, чем  $10^{-5}$ . В настоящее время в качестве значения коэффициента пропорциональности  $2q_0/h$  принято число 483597,9 ГГц/В без допущения какой-либо ошибки.

«За открытие, связанное с явлением туннелирования в твердых телах», Джозефсон был удостоен в 1973 г. Нобелевской премии по физике.

#### 4. ОТКРЫТИЕ ДЕЛЕНИЯ ТЯЖЕЛЫХ ЯДЕР

История открытия деления тяжелых ядер нейтронами требует последовательного и достаточно подробного изложения.

**4.1. Открытие нейтрона.** Первым шагом к открытию деления тяжелых ядер нейтронами, по-видимому, следует считать открытие собственно нейтрона. Еще в 1920 г. были высказаны предположения, что вместо электронов, связанных с частью протонов, в ядре имеются частицы с массой, равной массе протона, и не имеющие электрического заряда. Нейтрон, как писал Резерфорд в [11], «обладал бы совершенно фантастическими свойствами. Его внешнее поле должно практически равняться нулю, за исключением областей, весьма близко прилегающих к ядру; вследствие этого он должен обладать способностью свободно проходить через материю».

В 1930 г. Боте и Беккер изучали взаимодействие  $\alpha$ -частиц  $^{210}\text{Po}$  ( $E_\alpha = 5,3$  МэВ) с ядрами лития, бериллия и бора и обнаружили, что ядра бериллия под действием высокоэнергичных  $\alpha$ -частиц выбрасывают проникающее, не ионизирующее окружающее вещество излучение, способное проходить через толстый слой свинца.

В течение последующих двух лет опыты с этим излучением проводили многие физики и, в частности, И. и Ф. Жолио-Кюри. Однако объяснить вылет протонов отдачи действием неких гипотетических высокоэнергичных фотонов оказалось невозможным.

Чэдвик в 1932 г. [12], используя такую же методику отдачи, показал, что неизвестное неионизирующее излучение представляет собой нейтральные частицы с единичной атомной массой. Так был открыт нейтрон, за это открытие Чэдвик в 1935 г. получил Нобелевскую премию по физике.

Открытие нейтрона привело Д.Д. Иваненко к новому представлению о строении атомного ядра, которое он высказал в работах [13]. В них он

выдвинул предположение, что в атомных ядрах нет свободных электронов, как считалось до этого, а существуют только протоны, нейтроны и  $\alpha$ -частицы.

**4.2. Открытие искусственной радиоактивности ядер.** Эксперименты супругов И. и Ф. Жолио-Кюри с нераспознанным ими проникающим излучением завершились другим достижением — открытием искусственной радиоактивности, отмеченным в 1935 г. Нобелевской премией по химии «в признание синтеза новых радиоактивных элементов».

Супруги открыли три ядерные реакции типа  $(\alpha, n)$  на ядрах бора, алюминия и магния, ведущие к искусственным радиоактивным нуклидам, которые интересны тем, что распад новых ядер происходит с испусканием позитронов —  $\beta^+$ -частиц, в отличие от естественной  $\beta^-$ -активности, проявляющейся в испускании электронов.

**4.3. Загадка трансурановых элементов и открытие деления тяжелых ядер.** Другие исследователи — Ферми и его коллеги — облучали нейтронами различные мишени вплоть до урана в надежде получить новый заурановый элемент с атомным номером  $Z = 93$ . Если следовать терминологии, введенной Д. И. Менделеевым, ожидаемая реакция должна быть записана как  ${}^{238}\text{U} + n = {}^{239}\text{U} = {}^{239}\text{EkaRe} + \beta^-$ . Бомбардировка урана быстрыми и замедленными нейтронами после химической очистки от всех элементов с атомными номерами  $Z = 92-82$  привела к появлению  $\beta$ -активности с четырьмя новыми периодами полураспада, которые авторами были отождествлены с вероятными новыми трансурановыми элементами, имеющими атомные номера  $Z = 93$  и  $Z = 94$  [14].

В ответ на работу Ферми [14] Ида Ноддак в статье [15] написала, что химическое исключение соседних с ураном более легких элементов не является достаточным доказательством получения новых трансурановых элементов, поскольку «можно думать, что бомбардируемые нейтронами тяжелые ядра распадаются на несколько тяжелых фрагментов, которые являются изотопами известных элементов, а не соседями облучаемого элемента». Однако многие, в том числе Ган и Мейтнер, которые получили работу от И. Ноддак и читали ее, расценили эту идею как нефизическую.

В процессе этих опытов Ферми и его коллегами было обнаружено, что некоторые нуклиды приобретают особенно большую активность после облучения нейтронами, прошедшими через слой парафина или воды. Это было объяснено тем, что при прохождении нейтронов через вещества, содержащие атомы водорода, нейтроны быстро теряют свою кинетическую энергию в результате упругих и неупругих столкновений с ядрами водорода. В предельном случае нейтроны замедляются до тепловой энергии атомов водорода. Как следует из термодинамики, кинетическая энергия теплового движения, приходящаяся на один атом или одну молекулу, определяется соотношением  $E = kT$ , где  $k$  — постоянная Больцмана,  $T$  — абсолютная температура, и тогда энергия в 1 эВ эквивалентна тепловой энергии при температуре 11604,5 К.

Так что при комнатной температуре ( $T = 293$  К) энергия тепловых нейтронов равна  $E = 0,025$  эВ.

Замедление быстрых нейтронов происходит в результате неупругих столкновений нейтрона с ядрами замедлителя, когда кинетическая энергия нейтрона переходит в энергию возбуждения ядра замедлителя, либо в результате его упругого столкновения путем перехода кинетической энергии нейтрона в кинетическую же энергию ядра замедлителя, без передачи кинетической энергии в энергию возбуждения. Из закона сохранения импульса и требования сохранения кинетической энергии, имеющего место при упругом столкновении тел, следует, что максимальная энергия, переданная при центральном ударе движущимся телом с массой  $m_1$  и с энергией  $E_1$  покоящемуся телу с массой  $m_2$ , выражается формулой  $E_{2\max} = 4m_1m_2E_1/(m_1 + m_2)^2$ , из которой следует, что нейтрон ( $m_1 = 1$  а. е. м.) при таком столкновении с тяжелым ядром урана ( $m_2 = 238$  а. е. м.) теряет очень маленькую долю своей энергии (всего 1/170 часть), тогда как при столкновении с ядрами водорода ( $m_2 = 1$  а. е. м.), дейтерия ( $m_2 = 2$  а. е. м.) или углерода ( $m_2 = 12$  а. е. м.) эта доля составляет соответственно 1, 0,89 и 0,28. Чтобы замедлить нейтрон с энергией 1 МэВ до тепловых скоростей, потребуется всего 20 центральных и нецентральных упругих столкновений с ядрами легкого водорода (вероятность центрального и нецентрального столкновений зависит от случайного значения параметра удара). После этого энергия перемещения нейтрона сравнивается с энергией теплового движения атомов водорода, которая определяется окружающей температурой. Для замедления нейтрона до тепловой энергии в графите потребуется уже 120 упругих столкновений с углеродными атомами.

При тепловых энергиях сечение взаимодействия нейтрона с ядрами вещества определяется его волновыми свойствами и во много раз может превосходить сечение, определяемое геометрическими размерами нейтрона. Сечение захвата медленного нейтрона ядром, когда орбитальный момент количества движения нейтрона по отношению к ядру равен нулю, выражается формулой  $\sigma = \pi\lambda^2\zeta$ , где  $\lambda = h/mv$  — дебройлевская длина волны нейтрона,  $h$  — постоянная Планка, поделенная на  $2\pi$ ,  $m$  и  $v$  — масса и скорость нейтрона,  $\zeta$  — коэффициент прилипания медленного нейтрона к ядру. Квантово-механическое рассмотрение показывает, что вероятность прилипания нейтрона пропорциональна его скорости  $v$ , и приведенная выше формула имеет в конечном итоге вид  $\sigma = \text{const}/v$ .

В 1938 г. Ферми был удостоен Нобелевской премии по физике «за открытие новых радиоактивных элементов, полученных при испускании нейтронов, и связанное с этим открытие ядерных реакций с помощью медленных нейтронов».

Развивая дальше заинтересовавшие многих исследования продуктов облучения урана нейтронами, И. Кюри и Савич обнаружили [16] новое радио-

активное ядро с периодом полураспада 3,5 ч, которое они сначала идентифицировали как изотоп тория, но потом отнесли к изотопу лантана. В работе [17] Ган и его ученик Штрассман сообщили об обнаружении в продуктах облучения будто бы изотопов Th и Ra, вероятно, образующихся по следующим схемам:  $^{238}\text{U} + n = ^{239}\text{U} = ^{235}\text{Th} + \alpha$ ,  $^{235}\text{Th} = ^{231}\text{Ra} + \alpha$ . Такое предположение, как необычный, энергетически маловероятный процесс  $\alpha$ -распада нейтронно-обогащенных тяжелых ядер, вызвало серьезные возражения физиков Бора, Мейтнер и Фриша. Это подтолкнуло Гана и Штрассмана более тщательно проверить результаты опытов. Выделив ожидаемый элемент радий методом соосаждения с его ближайшим гомологом барием, Ган и Штрассман заявили следующее: «Как химики, мы должны сказать, что предмет исследований является барием, но не радием» [18].

Эти необычные результаты химических исследований были дополнены некоторыми физическими опытами, к числу которых, в первую очередь, следует отнести измерения кинетической энергии продуктов реакции, выполненные Фришем с помощью ионизационной камеры с сеткой, впоследствии получившей его имя [19]. Было показано, что кинетическая энергия одиночного продукта реакции, измеренная по числу ионизационных пар «положительный ион–электрон», произведенных в газовом наполнении ионизационной камеры, составляет около 70 МэВ, что существенно больше кинетической энергии известных  $\alpha$ -частиц.

МакМиллан [20] исследовал пробеги радиоактивных продуктов, вылетающих из тонкого слоя облучаемого урана. Для своих опытов он получал более интенсивный поток нейтронов, чем в реакции  $(\alpha, n)$ , путем бомбардировки бериллиевой мишени дейтронами, ускоренными на циклотроне до энергии 16 МэВ. Было показано, что продукты реакции вылетают с большой кинетической энергией.

В результате этих и других опытов родилась качественная интерпретация всех накопленных фактов как физического процесса деления исходного ядра урана под действием нейтронов на два других ядра-осколка приблизительно половинной массы, несущих большую кинетическую энергию. Эта интерпретация была дана Мейтнер и ее племянником Фришем [21] на основе качественного рассмотрения противодействия двух процессов — кулоновского отталкивания друг от друга одноименно заряженных протонов в ядре и стабилизирующего действия поверхностного натяжения ядра. Это явление авторы предложили назвать развалом, делением (disintegration) ядра по аналогии с делением живой клетки.

Удивительным обстоятельством в опытах МакМиллана [20] оказалась оставшаяся в уране часть радиоактивных продуктов, следовательно, не имеющая достаточной энергии для вылета из мишени. Это навело на мысль, что оставшиеся в уране радиоактивные продукты относятся не к делению, а к процессу получения нового элемента, который после другой работы МакМил-

лана и Абельсона [22] был расшифрован как цепочка  $^{238}\text{U} + n = ^{239}\text{U}(T_{1/2} = 23 \text{ мин}) = ^{239}\text{93}(T_{1/2} = 2,3 \text{ сут}) + \beta^-$ .

Так завершилась эпопея открытия деления тяжелых ядер нейтронами и решения задачи синтеза трансурановых элементов. В попытках синтезировать трансурановые элементы, предпринятых в начале 30-х гг. прошлого века, никому не удалось, несмотря на все усилия, корректно химически выделить из большой массы урана новые элементы и строго доказать их трансурановую природу. Причиной этого послужило, во-первых, то обстоятельство, что химики в то время не знали, что элемент с  $Z = 93$  не является аналогом элемента рения по причине заполнения внутренней электронной оболочки  $5f$ . Во-вторых, при облучении урана медленными нейтронами с большой вероятностью происходило неизвестное тогда деление ядер изотопа  $^{235}\text{U}$  на два других ядра, вызывающее появление большого числа мешающих радиоактивных излучателей.

В дальнейшем МакМиллан предложил назвать новый элемент с атомным номером  $Z = 93$  нептунием по аналогии с планетой Нептун, расположенной в Солнечной системе за Ураном.

В апреле 1945 г. Ган вместе с другими немецкими физиками был вывезен в Англию, где он узнал о присуждении ему Нобелевской премии по химии 1944 г. «за открытие деления тяжелых ядер».

Астон в своих масс-спектрографических измерениях в 1935 г. обнаружил в природном уране только один изотоп —  $^{238}\text{U}$ , имеющий наибольшее содержание. В 1940 г. Ниру и др. [23] удалось установить, используя достаточно совершенный магнитный масс-спектрограф, что элемент уран имеет три радиоактивных долгоживущих изотопа:  $^{238}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$  и  $^{234}\text{U}$  с содержанием последних двух изотопов соответственно 1/139 и 1/17000 по отношению к содержанию изотопа  $^{238}\text{U}$ . Далее Нир и др., используя масс-спектрограф уже как масс-сепаратор, накопили изотоп  $^{235}\text{U}$  в количестве 0,2 мкг. Накопленного количества оказалось достаточно, чтобы установить, что  $^{235}\text{U}$  хорошо делится как энергичными (с энергией 1–2 МэВ), так и тепловыми нейтронами, причем тепловыми — с большим эффективным сечением ( $\sigma_f = 600 \text{ б}$ ).

## 5. ВТОРИЧНЫЕ НЕЙТРОНЫ ПРИ ДЕЛЕНИИ ТЯЖЕЛЫХ ЯДЕР

При делении нейтронами тяжелых ядер, имеющих повышенное содержание нейтронов по сравнению с содержанием протонов, образуются два более легких ядра-осколка с еще большим относительным обогащением нейтронами (по сравнению со стабильными нуклидами в средней области массовых чисел) и, следовательно, с пониженной энергией связи нейтронов. Поэтому деление тяжелого ядра на два возбужденных осколка сопровождается мгновенной эмиссией из осколков нейтронов, вторичных по отношению к первич-



ному нейтрону, вызвавшему деление. Осколки деления при этом могут претерпевать несколько последовательных  $\beta$ -превращений, иногда приводящих к возбужденным дочерним ядрам, испускающим дополнительные нейтроны.

**5.1. Выход вторичных мгновенных нейтронов.** В начале 1939 г. Хальбан, Жолио и Коварский, работавшие тогда во Франции, показали [24], что непосредственно в процессе деления урана действительно возникают новые, вторичные нейтроны, усредненное число которых на один акт деления  $\nu = 2,5 \pm 0,7$ .

Тогда в измерениях числа нейтронов, вылетающих при делении урана, было важно установить, что значение  $\nu$  больше единицы. Это означало, что имеется принципиальная возможность стационарного, незатухающего цепного процесса деления, т. е. процесса, когда хотя бы один из нескольких вторичных нейтронов, рожденных при делении первого ядра урана, вызовет деление второго ядра урана с испусканием уже нейтронов третьего поколения, и, таким образом, процесс деления, начатый случайным, например космическим, нейтроном, не прекратится.

Реальная возможность осуществления цепной — затухающей или незатухающей — реакции деления определяется, в первую очередь, точным значением числа вторичных нейтронов на один акт деления, количеством и геометрией расположения делящегося вещества, сечениями деления и сечениями конкурирующих процессов.

Опыты по определению этой важной для цепного процесса деления константы  $\nu$  в Советском Союзе были проведены приблизительно в то же время Л. И. Русиновым и Г. Н. Флеровым [25]. Эти опыты дали значение  $\nu = 3 \pm 1$ .

По поводу опытов по измерению константы  $\nu$  Г. Н. Флеров в статье [26, с. 29] вспоминал: «Но о самом главном в этой работе — доказательстве существования вторичных нейтронов — мы не успели сообщить первыми. Курчатов заставил нас, как всегда, все проверять и перепроверять, считать и пересчитывать, и когда мы со Львом Ильичом Русиновым собрались, наконец, докладывать свои результаты на семинаре — вышла в свет статья Жолио-Кюри и его сотрудников. И датирована она была одиннадцатью днями раньше нашего доклада».

В опытах Сциларда и Зина это число было найдено также равным «примерно двум» на один акт деления урана [27] или 2,3 [28], однако без указания ошибки измерений.

Измеренные позднее более точно значения  $\nu$  для различных делящихся тепловыми нейтронами ядер приведены в табл. 1, взятой из обзора Б. Г. Ерозолимского «Нейтроны деления» [29, с. 74]. В таблицу включены данные не только для естественных изотопов урана  $^{233}\text{U}$  и  $^{235}\text{U}$ , но и для искусственно получаемых тяжелых нуклидов  $^{239}\text{Pu}$  и  $^{241}\text{Pu}$ . Время испускания мгновенных нейтронов по теоретическим оценкам составляет  $10^{-14}$ – $10^{-16}$  с. Из результатов экспериментов следует, что это время не превосходит  $10^{-14}$  с.

Таблица 1. Значения среднего числа вторичных нейтронов  $\nu$ , испускаемых на один акт деления некоторыми ядрами, делящимися тепловыми нейтронами

Страна	Ядро			
	$^{235}\text{U}$	$^{233}\text{U}$	$^{239}\text{Pu}$	$^{241}\text{Pu}$
СССР	$2,5 \pm 0,1$	$2,065 \pm 0,025$	$3,0 \pm 0,12$	$3,1 \pm 0,12$
Великобритания	$2,45 \pm 0,15$	$2,46 \pm 0,15$	$2,86 \pm 0,18$	$2,98 \pm 0,18$
США	$2,45 \pm 0,03$	$2,56 \pm 0,03$	$2,93 \pm 0,04$	

**5.2. Выход вторичных запаздывающих нейтронов.** В работе [30] было обнаружено, что очень небольшая доля вторичных нейтронов испускается с некоторым опозданием после, по существу, мгновенного (за время  $10^{-14}$  с) акта деления. Согласно экспериментальным данным время запаздывания вылета нейтронов составляет от 0,05 с до 120 мин, и их полный выход не превышает 1 % от выхода мгновенных нейтронов.

Запаздывающие нейтроны возникают в результате ядерного девозбуждения образующихся в возбужденном состоянии первичных осколков деления и их дочерних, и более далеких продуктов  $\beta$ -распада.

Это явление очень важно для регулирования интенсивности цепной реакции деления путем управляемого поглощения запаздывающих избыточных нейтронов специальными элементами (поглощающими стержнями) в ядерном реакторе деления.

## 6. МОДЕЛЬ ДЕЛЕНИЯ ТЯЖЕЛЫХ ЯДЕР

Достаточно совершенная модель деления тяжелых ядер была предложена в работе Бора и Уилера [31] «Механизм ядерного деления», вышедшей в свет 1 сентября 1939 г., в день начала Второй мировой войны. В этой войне было продемонстрировано военное применение ядерной энергии деления тяжелых ядер, возможность которого показана в статье. Заметим, что Н. Бор в то время уже являлся лауреатом Нобелевской премии по физике 1922 г. «за заслуги в изучении структуры атома и излучения из него».

**6.1. Энергия, выделяющаяся при делении тяжелых ядер.** Первый вопрос, который возникает при обращении к делению тяжелых ядер как источнику энергии, это вопрос о количестве энергии, выделяемой в результате распада одного тяжелого ядра на два меньших ядра, приблизительно половинных масс. Полная энергия, выделяемая в результате деления, определяется общим соотношением (7) СТО. Экспериментальные значения масс осколков деления в то время были неизвестны, поэтому авторы [31] в соответствии с

доводами Гамова (ссылка на какую-либо работу Гамова не приводится) допустили, что

$$M(Z, A) = A(1 + f_A) + B_A \frac{(Z - Z_A)^2}{2} + \begin{cases} 0 & \text{для } A \text{ нечетного,} \\ -\delta_A/2 & \text{для } A \text{ четного, } Z \text{ нечетного,} \\ \delta_A/2 & \text{для } A \text{ четного, } Z \text{ нечетного,} \end{cases} \quad (11)$$

где  $M(Z, A)$  — масса осколка деления с атомным номером  $Z$  и массовым числом  $A$ ;  $Z_A$  — некоторое условное значение атомного номера, не обязательно целочисленное, лежащее на линии наибольшей стабильности нуклидов;  $f_A$  — упаковочное отношение (см. формулу (9)), усредненное в некотором узком интервале массовых чисел  $A$ ;  $B_A$  — некоторый коэффициент, который не может быть определен непосредственно из эксперимента, но может быть оценен некоторым образом. Значения  $\delta_A$ , определяющие влияние четности числа нуклонов в ядре на его массу, были извлечены из сводной таблицы экспериментально измеренных тогда масс стабильных ядер.

Используя формулу (11), Бор и Уилер показали, что ядра с массовым числом  $A < 100$  энергетически устойчивы относительно деления на два осколка с приблизительно равными массами. Ядра же с массовыми числами  $A > 100$  энергетически нестабильны по отношению к делению с освобождением при этом энергии до  $\sim 200$  МэВ.

**6.2. Жидкокапельная модель деления.** Объяснение механизма деления тяжелых ядер в работе Бора и Уилера [31] основывается, так же, как и в работе [21], на представлении о ядре как о классической заряженной жидкой капле, устойчивость формы которой в значительной мере определяется ролью противоположных по действию капиллярных сил поверхностного стягивания капли и сил внутреннего электростатического расталкивания заряженного вещества капли. Процесс деления тяжелого ядра поэтому описывается в рамках так называемой жидкокапельной или капельной модели (liquid drop model) деления как последовательное разделение на две части капли заряженной жидкости.

Заметим, что авторы работы [31] иногда используют и другое прилагательное в названии модели — «капельковая» (droplet) модель. Однако собственно «капельковая» модель, предложенная позднее в работе [32], была разработана для более точного представления легких ядер, т. е. маленьких, «капельковых» ядер.

Аналогичная жидкокапельная модель деления была независимо предложена также Я. И. Френкелем [32] незадолго до выхода работы [31]. Бор и Уилер сочли необходимым сообщить, что основные их формулы совпадают с формулами, полученными Я. И. Френкелем.

Деление в рамках жидкокапельной модели происходит путем развития небольших деформаций сферической поверхности несжимаемой заряженной капли, которые Бор и Уилер описывают в виде следующей суммы полиномов Лежандра:

$$\mathbf{r}(\theta) = R[1 + \alpha_0 + \alpha_2 P_2(\cos \theta) + \alpha_3 P_3(\cos \theta) + \alpha_4 P_4(\cos \theta) + \dots], \quad (12)$$

где  $\mathbf{r}(\theta)$  — радиус-вектор, проведенный из центра первоначально сферической капли с радиусом  $R$  под углом  $\theta$  к оси симметрии вращения;  $\alpha_n$  — малый параметр, характеризующий величину отклонения формы от сферической;  $P_n(\cos \theta)$  — угловой полином Лежандра  $n$ -го порядка, характеризующий тип осесимметричного отклонения формы капли от сферы в зависимости от полярного угла  $\theta$ .

Как известно, угловые полиномы Лежандра являются частными решениями классического электростатического уравнения типа уравнения Пуассона, описывающего внутреннее и внешнее электрические поля осесимметричного заряженного тела:

$$\Delta U = -4\pi\rho, \quad (13)$$

где  $U$  — скалярный потенциал, определяющий электростатическую энергию тела;  $\rho$  — объемная плотность электрического заряда в теле.

В общем случае полином Лежандра  $n$ -го порядка является решением одноименного линейного дифференциального уравнения второго порядка относительно переменной  $x$  и представляется в общем виде как  $P_n(x) = (1/n!2^n)d^n[(x^2 - 1)^n]/dx^n$  (см., например, [34, с. 475]). После подстановки  $x = \cos \theta$  полиномы уже в виде  $P_n(\cos \theta)$  выражают угловую структуру мультипольных электрических полей порядка  $M = 2n$ , где  $M$  — порядок мультипольности электрического поля,  $n$  — порядок полинома Лежандра.

Радиальная структура электрического поля заряженного тела выражается при этом, согласно решениям уравнения Пуассона (13), поверхностным распределением электрического заряда тела в виде тонкого  $\delta(R-r)$ -слоя, где  $\delta$  — известная дельта-функция Дирака, удовлетворяющая условию  $\int \delta(x)dx = 1$ . Теория  $\delta$ -функции и ее применение для решения некоторых задач электростатики дается, например, в монографии Д. Иваненко и А. Соколова [35]. В частности, как можно показать, собственными решениями уравнения Пуассона для плотности заряда и потенциала внутреннего поля ( $r < R$ ) являются следующие выражения:

$$\rho(r, \theta) = eP_1(\cos \theta)\delta(r - R) = e \cos \theta \cdot \delta(r - R) \text{ и } U(r, \theta) = er \cos \theta / R^2 \quad (14)$$

для диполя ( $n = 1$ ) и

$$\begin{aligned} \rho(r, \theta) &= P_2(\cos \theta)e\delta(R - r) = e(3 \cos^2 \theta - 1)\delta(R - r)/2, \\ U(r, \theta) &= er^2(3 \cos^2 \theta - 1)/2R^3 \end{aligned} \quad (15)$$

для квадруполья ( $n = 2$ ).

В работе [31] упрощается структура электрического поля заряженной капли и полиномами Лежандра задается не угловое распределение плотности заряда в тонком поверхностном  $\delta(R - r)$ -слое сферической капли, а форма малых деформаций поверхности сферы  $r(\theta)$ , но уже с однородной по всему объему плотностью заряда капли  $\rho$ . Такая замена является удобной для вычислений энергии капли при ее деформации в процессе деления. В случае, например, квадрупольного поля ( $n = 2$ ), используемого в работе [31] как низшее, основное приближение, имеем один и тот же тип радиальной зависимости внутреннего потенциала поля ( $r^2$ ) как в случае точного решения (15) уравнения Пуассона (13), так и в случае, как легко показать, равномерно заряженной деформированной сферы.

В [31] учтены с помощью разложения (12) малые деформации ( $\alpha_n \ll 1$ ) формы заряженной капли  $\delta r(\theta) = \alpha_n R P_n(\cos \theta)$  только порядков  $n = 2, 3$  и 4, которые показаны в верхнем ряду рис. 2.

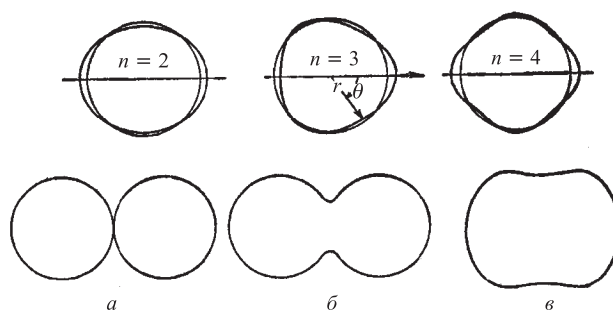


Рис. 2. Возможные малые осесимметричные деформации формы ядра (верхний ряд). Предельные деформации формы ядра, после которых наступает деление ядра-капли (нижний ряд) [31]. Подробные объяснения см. в тексте

В разложение (12) не вошла дипольная деформация  $\alpha_1 P_1(\cos \theta) = \alpha_1 \cos \theta$ , характеризуемая индексом  $n = 1$ , которая, например, в монографии [36, с. 313] и в ряде других работ рассматривается в первом приближении по малому значению коэффициента деформации  $\alpha_1$  как простое механическое смещение жидкой капли относительно первоначального положения центра масс, которое не влияет на собственную электростатическую энергию заряженной капли и поэтому не учитывается.

Заметим, что аналогичное смещение центра масс, несовместимое с законом сохранения положения центра масс при действии на тело только внутренних сил, имеющих место при делении ядра, проявляется в используемом разложении (12) и для любой другой деформации с нечетным индексом  $n$ .

Член  $\alpha_0 P_0(\cos \theta) = \alpha_0$  в разложении (12) может отсутствовать при условии перенормировки значения  $R$  — начального радиуса сферы деформирующейся капли.

В случае асимметричного относительно продольной оси деформированного тела мультипольность зарядов определяется как  $M = 2^n$ . В частности, при  $n = 1, 2, 3, 4$  имеем диполь, квадруполь, секступоль и октуполь в осесимметричной системе зарядов и диполь, квадруполь, октуполь и секстадекаполь в неосесимметричной системе. Такое различие классификаций мультиполей иногда не замечают.

Из выражения для суммы поверхностной и кулоновской энергий заряженной капли при ее осесимметричной деформации следует, что величина  $Z^2/A$ , названная авторами [31] параметром делимости, обязательно должна быть меньше некоторого предельного значения, равного

$$(Z^2/A)_{\text{lim}} = 40\pi O r_0^3 / 3e^2 = 47,8, \quad (16)$$

где  $O$  — коэффициент поверхностного натяжения капли.

В нижнем ряду рис. 2 даны предельные деформации капли-ядра, после которых следует деление. Для осуществления деления в предельном случае значения параметра (16) не требуется какой-либо деформации сферического ядра (рис. 2, *в*). При меньшем значении заряда ядра, или, точнее, при меньшем значении параметра делимости  $Z^2/A$  для разделения ядра необходима некоторая деформация (рис. 2, *б*) и для совсем не заряженной жидкой капли требуемая деформация представляет собой две касающиеся сферы с массами, равными половине массы исходной капли (рис. 2, *а*).

Энергия возбуждения  $E_f$ , которую необходимо внести в компаунд-ядро, чтобы получить критическую деформацию ядра, сопровождаемую обязательным разделением начального ядра на две части, названа авторами энергией активации деления:

$$E_f / 4\pi r_0^2 O A^{2/3} = f(x) = 98(1-x)^3 / 135 - 11368(1-x)^4 / 34425 + \dots, \quad (17)$$

где  $x = Z^2/A / (Z^2/A)_{\text{lim}}$  — относительный параметр делимости.

Найденная кривая  $f(x)$ , определяющая энергию активации процесса деления ядра, в зависимости от параметра  $x$ , приведена на рис. 3, взятом из статьи [31].

Основные результаты, следующие из рис. 3, представлены для компаунд-ядер  $^{233}\text{Th}$ ,  $^{239}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Pa}$ ,  $^{236}\text{U}$  и  $^{235}\text{U}$  числами без скобок в табл. 2. В таблице приведена энергия активации деления  $E_f$  в сопоставлении с энергией возбуждения компаунд-ядра, внесенной при захвате ядром теплового нейтрона и тождественно равной энергии связи нейтрона  $B_n$ . В последнем ряду таблицы приведена энергия порога деления ядра нейтронами  $E_t = E_f - B_n$ .

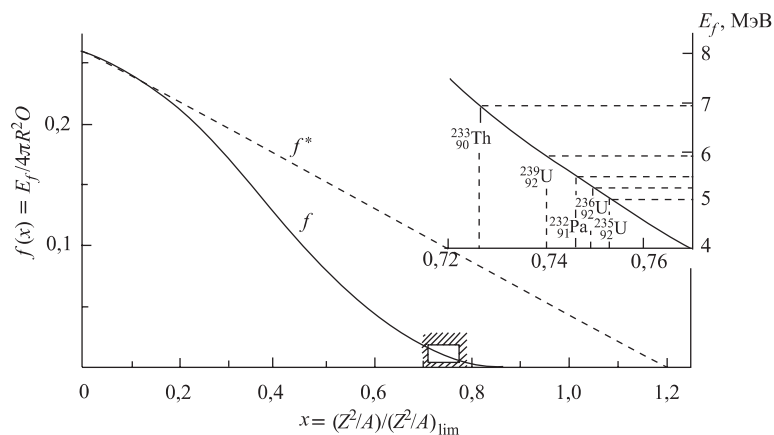


Рис. 3. Энергия возбуждения ядра  $E_f$ , требующаяся для достижения критической деформации ядра, ведущей к его делению, в зависимости от параметра делимости  $x = (Z^2/A)/(Z^2/A)_{\text{lim}}$  [31]. Энергия активации деления выражена в единицах поверхностной энергии ядра  $4\pi R^2 O$

Из данных табл. 2 был сделан вывод, что ядра изотопов урана —  $^{234}\text{U}$  и  $^{235}\text{U}$ , а также ядра  $^{231}\text{Pa}$  способны делиться уже тепловыми нейтронами, поскольку энергия возбуждения, вносимая в компаунд-ядро медленным нейтроном, больше энергии активации деления. Впоследствии этот теоретический результат подтвердился экспериментами только для  $^{235}\text{U}$  и не подтвердился для  $^{234}\text{U}$  и  $^{232}\text{Pa}$ . Это обстоятельство в табл. 2 представлено более поздними данными (в скобках), взятыми из обзорной статьи [37].

Таблица 2. Энергия активации деления некоторых компаунд-ядер и энергия связи последнего нейтрона

Компаунд-ядро	$^{233}\text{Th}$	$^{239}\text{U}$	$^{232}\text{Pa}$	$^{236}\text{U}$	$^{235}\text{U}$
$E_f$ , МэВ	7,0 (6,64)	5,9 (6,28)	5,50 (6,50)	5,2 (5,9)	5,0 (5,86)
$B_n$ , МэВ	5,2 (5,09)	5,2 (4,78)	6,4 (5,65)	6,4 (6,44)	5,4 (5,25)
$E_t$ , МэВ	1,8 (1,55)	0,7 (1,50)	-0,9 (0,85)	-1,2 (-0,54)	-0,4 (0,28)

Ядра основного природного изотопа урана  $^{238}\text{U}$  подвержены делению только нейтронами с кинетической энергией более 0,8 МэВ.

В работе [31] Бором и Уилером было отмечено: «Кажется, что протактиний будет особенно интересным как объект экспериментов по делению».

При этом авторы, несомненно, имели в виду то, что делящийся, по их мнению, тепловыми нейтронами нуклид  $^{231}\text{Pa}$ , как единственный относительно долгоживущий изотоп протактиния, может быть выделен из руды простым химическим способом без применения трудоемкой диффузионной, центрифужной или электромагнитной изотопной сепарации. Это замечание Бора и Уилера можно рассматривать как предпосылку к сделанному позднее важному предложению использовать искусственное накопление  $^{239}\text{Pu}$  путем облучения  $^{238}\text{U}$  нейтронами и его последующее химическое выделение в противовес трудоемкому выделению изотопа  $^{235}\text{U}$  физическими методами из естественной смеси изотопов урана.

Однако заметим, что изотоп протактиния  $^{231}\text{Pa}$  присутствует в урановой руде в ничтожно малых количествах ( $3 \cdot 10^{-5} \%$  по отношению к  $^{238}\text{U}$ ), не имеющих значения для практического применения в качестве возможного источника ядерной энергии, если исходить из разведанных запасов урановой руды на Земле.

Не рассмотренная в работе [31] дипольная деформация отвечает, как это потом было показано А. Б. Мигдалом [38], колебаниям центра масс всех протонов относительно центра масс всех нейтронов без изменения первоначального положения общего центра масс. Эти колебания проявляются в известном гигантском дипольном резонансе (ГДР) ядер. ГДР, характеризуемый относительно большим сечением его возбуждения ( $\sim 0,1$  б в максимуме) и относительно большой шириной (2–10 МэВ на половине высоты пика резонанса), хорошо возбуждается  $\gamma$ -лучами, несущими дипольное электромагнитное поле, и не возбуждается нейтронами, не имеющими электрического заряда. Положение максимума ГДР на шкале энергий возбуждения ядра смещается в сторону меньших значений энергии при увеличении массы ядер в силу уменьшения при этом жесткости колебаний ядер. Для наиболее тяжелого ядра  $^{249}\text{Cf}$ , резонансная кривая фотоделения которого измерена к настоящему времени [39], максимум гигантского дипольного резонанса лежит еще при достаточно высокой энергии 13,0 МэВ.

**6.3. Другие ветви распада возбужденного тяжелого составного ядра.** Составное тяжелое ядро с энергией возбуждения, превышающей энергию активации деления, не обязательно подвергнется делению, а может испытать или эмиссию нейтрона, или эмиссию  $\gamma$ -кванта. Из рассмотрений в [31] следует, что  $\Gamma_f$  — энергетическая ширина уровня ядра по отношению к делению, являющаяся в виде отношения  $\Gamma_f/h$  мерой вероятности деления в единицу времени, равняется  $\Gamma_f = (d/2\pi)N^*$ , где  $d$  — среднее расстояние между соседними энергетическими уровнями в возбужденном компаунд-ядре,  $N^*$  — число возбужденных уровней компаунд-ядра, лежащих выше барьера деления.

Аналогичные выражения получены и для нейтронной и радиационной ширин уровней ядра  $\Gamma_n$  и  $\Gamma_r$ , определяющих относительную вероятность ис-



пускания нейтрона и  $\gamma$ -кванта путем отнесения частичной ширины к полной ширине  $\Gamma = \Gamma_f + \Gamma_n + \Gamma_r$ .

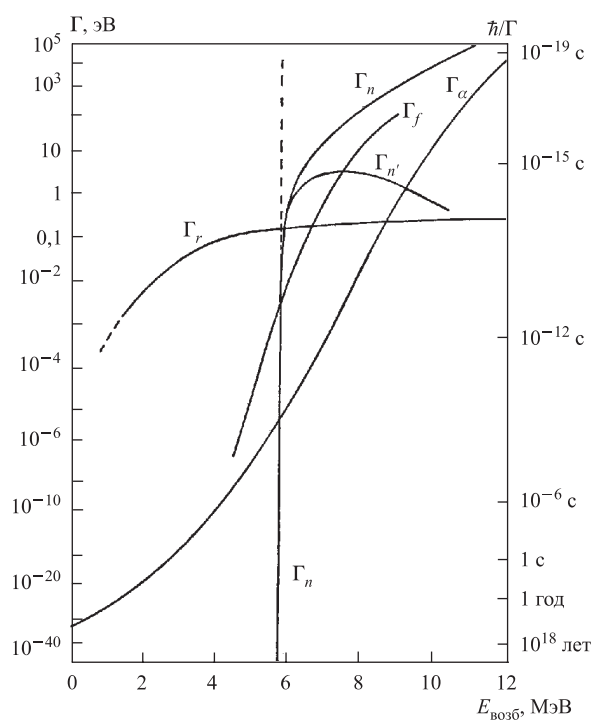


Рис. 4. Парциальные ширины уровней «типичного тяжелого ядра» для его деления  $\Gamma_f$ , испускания нейтрона  $\Gamma_n$ , электромагнитного кванта  $\Gamma_r$  или  $\alpha$ -частицы  $\Gamma_\alpha$ , определяющие относительную вероятность соответствующего распада (слева) и среднее время жизни ядра до осуществления распада (справа), в зависимости от энергии возбуждения составного ядра

На рис. 4, взятом из статьи [31], показаны для «типичного тяжелого ядра» парциальные ширины уровней в зависимости от энергии возбуждения составного ядра. Вблизи барьера делительная ширина  $\Gamma_f$  экспоненциально растет от  $10^{-8}$  эВ в подбарьерной области до 10 эВ при энергии возбуждения компаунд-ядра  $\sim 10$  МэВ над барьером, что отвечает времени процесса деления ядра  $\sim 10^{-17}$  с. Ниже энергии связи последнего нейтрона в составном ядре нейтронная ширина  $\Gamma_n$  строго равняется нулю, а затем резко увеличивается до 100 эВ при энергии возбуждения  $\sim 10$  МэВ. Время испускания нейтрона в этом случае снижается до  $\sim 10^{-19}$  с. Радиационная ширина уровней  $\Gamma_r$  в

интервале энергий возбуждения составного ядра  $E = 2-12$  МэВ сохраняет приблизительно постоянное значение  $\sim 0,1$  эВ, отвечающее времени испускания электромагнитного излучения  $\sim 10^{-13}$  с.

**6.4. Резонансный захват нейтронов ураном-238 и деление тепловыми нейтронами урана-235.** В экспериментах наблюдалось, что нейтроны с энергией несколько эВ вызывают в уране  $\beta$ -активность с периодом полураспада 23 мин, химически идентифицированную как принадлежащую к урану. Эта активность обусловлена радиационным резонансным захватом нейтрона изотопом урана  $^{238}\text{U}$  на уровень с энергией  $E_0 = (25 \pm 10)$  эВ и шириной  $\Delta = 2(E_0 kT/238)^{1/2} = 0,12$  эВ и с большим резонансным значением сечения. Однако с замедлением нейтронов, по мере ухода их энергии от резонансного значения, сечение захвата снижается до  $\sigma_{r(\text{therm})} = 0,4 \cdot 10^{-24}$  см<sup>2</sup>.

Усредненное по природному составу изотопов урана экспериментально найденное сечение деления тепловыми нейтронами составляет  $(2-3) \times 10^{-24}$  см<sup>2</sup>, что больше или сравнимо с сечением мешающего радиационного захвата нейтронов основным изотопом урана  $^{238}\text{U}$ .

**6.5. Спонтанное деление тяжелых ядер.** Явление деления тяжелых ядер нейтронами рассматривалось Бором и Уилером [31] как классический процесс, протекающий над вершиной энергетического барьера при деформации формы ядра. В связи с этим вполне естественно возник вопрос, что может дать дополнительно для увеличения вероятности деления ядра  $^{238}\text{U}$  тепловыми нейтронами эффект квантово-механического туннелирования компаунд-ядра  $^{239}\text{U}$  сквозь энергетический барьер при его деформации.

Следуя известной теории  $\alpha$ -распада, Бор и Уилер использовали для определения вероятности деления тяжелого ядра в единицу времени  $\lambda_f$  следующую формулу Гамова (ссылка на работу Гамова в статье [31] не приводится):

$$\lambda_f = 5(\omega_f/2\pi) \exp \left\{ -2 \int [2(V - E)\Sigma m_i(dx_i/dv_i)^2]^{1/2} d\alpha/h \right\}, \quad (18)$$

где  $V$  — потенциальный барьер, препятствующий делению;  $E$  — начальная энергия ядра;  $m_i$  — массы нуклонов в ядре, а  $x_i$  — их координаты.

Интегрирование (18) в пространстве параметров  $\alpha$  от точки стабильного равновесия ядра до точки выхода системы из-под барьера, где кинетическая энергия согласно определению  $V - E$  из отрицательной снова превращается в положительную, привело к заключению, что значение среднего времени жизни по отношению к самопроизвольному туннельному делению невозбужденного ядра  $^{239}\text{U}$  должно быть  $1/\lambda_f = 10^{22}$  лет.

Заметим, что, рассматривая далее деление тяжелого ядра под действием заряженных частиц (дейтронов и протонов), Бор и Уилер [31] приводят новую форму гамовской формулы, определяющей квантово-механическую проницаемость энергетического барьера, ссылаясь при этом на работу Бете [40]. В

новой форме экспоненциальный показатель в формуле (18) представлен проинтегрированным в общем виде во внешнем кулоновском потенциале вида  $1/r$  и выражен в итоге через обратную тригонометрическую функцию следующим образом:

$$P = (4Ze^2/hv)[\arccos x^{1/2} - x^{1/2}(1-x)^{1/2}], \quad (19)$$

где  $x = ER/Ze^2$ .

Операция «непосредственного», как сказано в работе Бете [40], интегрирования не представлена, однако для желающих убедиться в правильности перехода от формулы (18) к формуле (19) подскажем, что интегрирование проведено по частям и применено к подынтегральной функции последовательно четыре раза и с одной заменой переменной.

В том же 1939 г. Либби в Калифорнийском университете предпринял две попытки обнаружить самопроизвольный процесс деления ядер урана и тория путем поиска их радиоактивных продуктов деления и путем регистрации вторичных нейтронов, сопровождающих деление. Обе попытки дали отрицательные результаты на уровне нижней границы времени жизни по отношению к спонтанному делению, равной  $10^{14}$  лет [41].

Следующая попытка обнаружить спонтанное деление урана была принята уже в СССР. Эта работа началась с того, что И. В. Курчатов поручил провести эксперименты по изучению возможности протекания цепной реакции деления в естественном уране Г. Н. Флерову [42]. Для получения необходимого для опытов количества урана пришлось скупить во всех магазинах фотопринадлежностей Ленинграда весь имевшийся там в продаже азотнокислый уранил, используемый как фиксаж-вираж для закрепления и окраски черно-белых фотоотпечатков в желто-зеленые тона. Урана «скупил почти на шестьсот рублей — большие по тем временам деньги, которые специально достал на эксперимент Игорь Васильевич» [43]. Результаты опытов оказались неожиданными: шар из спрессованной окиси урана с помещенным внутри него фотонейтронным источником ослаблял поток нейтронов, а контрольный свинцовый шар практически на него не влиял [44]. Это означало, что возможное размножение нейтронов за счет деления ядер урана заведомо подавлялось негативным влиянием неупругого рассеяния нейтронов на тех же ядрах.

Чтобы разобраться в полученных результатах опыта по осуществлению, а точнее сказать, по неосуществившейся цепной реакции деления, нужен был детектор с существенно большей чувствительностью. «После некоторых размышлений, анализа вариантов (совместных с К. А. Петржаком), — продолжает [43] Г. Н. Флеров, — остановились на (ионизационной) камере деления (с урановым слоем на электродах-пластинах)... Двадцать пять пластин камеры были жестко закреплены. Общая их площадь равнялась тысяче квадратных сантиметров... Мы решили провести длительный фоновый опыт. И не

напрасно. Через некоторое время на экране (осциллографа) возник мощный импульс, характерный для осколков деления. . . Пришлось отложить измерения с фотонейтронными источниками и до конца выяснить причины неожиданного «фона». . . Игорь Васильевич наметил контрольные эксперименты. . . Прошел месяц. И. В. Курчатов пришел к заключению, что вся совокупность экспериментальных данных служит бесспорным доказательством нового вида радиоактивности» — спонтанного деления ядер урана. «Короткую заметку, подписанную К. А. Петржаком и мной, о нашем открытии А. Ф. Иоффе направил по трансатлантическому кабелю — каблогаммой — в американский журнал «Physical Review», и в июне 1940 г. она увидела свет [45]». Несомненно, что в списке авторов этого и параллельных [46] сообщений первой должна была стоять фамилия И. В. Курчатова, однако «он не хотел «затенять» своих учеников» и исключил свою фамилию из списка авторов.

В одном из опытов была использована камера со слоем тория, и авторы [47] смогли за несколько суток оценить нижнюю границу периода полураспада по отношению к спонтанному делению для тория, которая оказалась равной  $10^{19}$  лет. Только в 1943 г. появилась публикация Позе [48], подтверждающая результат Флерова и Петржака о существовании спонтанного деления ядер урана.

В 1943 г. И. В. Курчатов из материалов разведки узнал также о подтверждении открытия спонтанного деления урана, прокомментировав эти материалы словами: «Для нас было очень важно узнать, что Фриш подтвердил открытое советскими физиками Г. Н. Флеровым и К. А. Петржаком явление самопроизвольного деления урана. . . » [49, с. 318; 356]. В то время Фриш, известный по статьям [19] и [21], работал в Великобритании над задачей создания ядерной бомбы, и время жизни делящихся ядер по отношению к спонтанному делению, также сопровождаемому эмиссией нейтронов, необходимо было знать для оценки допустимой величины половины критической массы ядерного заряда и, следовательно, его возможной взрывной мощности.

**6.6. Дальнейшие исследования деления тяжелых ядер.** В 1953 г. Хиллом и Уилером была опубликована работа [50] под названием «Строение ядра и интерпретация явлений деления», в которой были подведены итоги последних теоретических и экспериментальных исследований процесса деления тяжелых ядер. Приведем основные результаты этой статьи.

На рис. 5 показаны критические фигуры неустойчивого равновесия, отвечающие началу самопроизвольного разделения делящегося ядра на два осколка при различных значениях относительного параметра делимости  $x$ . Эти фигуры являются детализацией фигур критической деформации ядра, представленных внизу на рис. 2. Критические фигуры построены [50] с использованием вычислений Франкеля и Метрополиса [51]. Для условного ядра «космия», характеризуемого  $x = 1$  и находящегося далеко за существующими пределами устойчивости, неустойчивой формой является уже сфера.

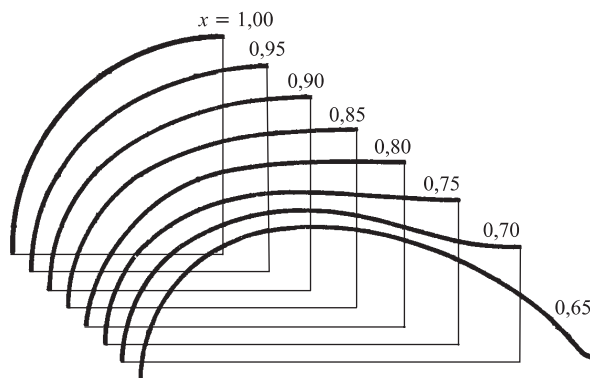


Рис. 5. Критические фигуры неустойчивого равновесия [50, 51]

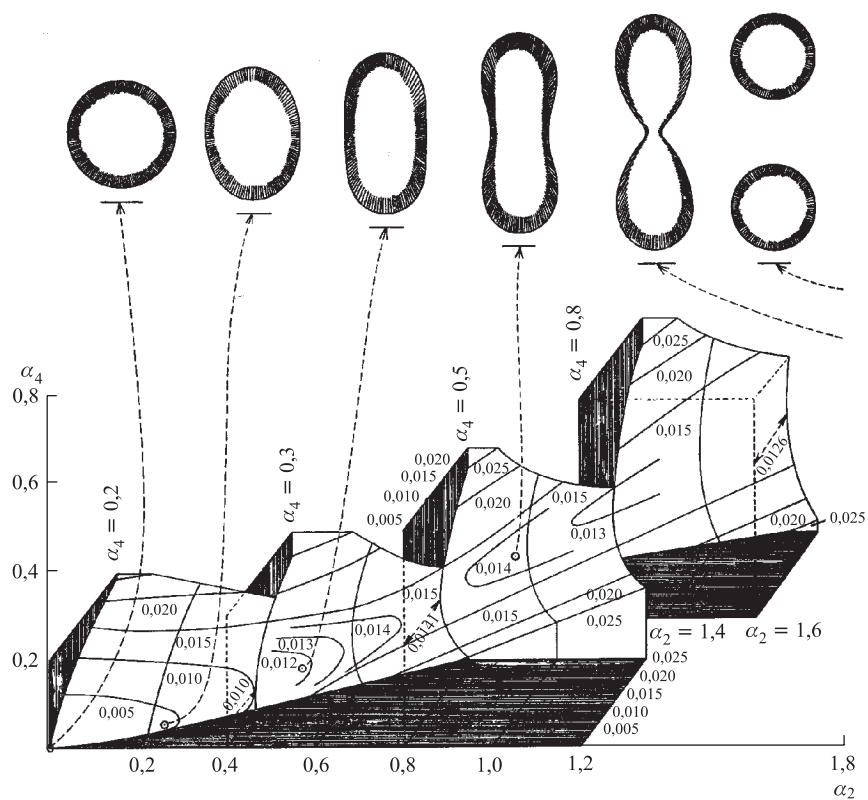


Рис. 6. Последовательность развития форм ядра и потенциальной энергии при деформации ядра,  $x = 0,74$

Для описания начальной формы ядра в работе [51] вместо сферы использовался эллипсоид, обеспечивающий более быструю сходимость процесса вычисления результатов. Неравенство трех полуосей эллипса «снимает симметрию вращения» и приводит к осевой асимметрии, описываемой шаровыми функциями, зависящими уже от двух угловых координат  $\theta$  и  $\varphi$  сферической системы [34, с. 475], — более общими решениями уравнения Пуассона, чем полиномы Лежандра.

На рис. 6, взятом из работы [51], показана последовательность фигур, приводящих к делению, с дополнительно поясняющей иллюстрацией изменения потенциальной энергии ядра при его делении в зависимости от параметров деформации  $\alpha_2$  и  $\alpha_4$ . Заметим, что указанное на рисунке значение относительного параметра делимости  $x = 0,74$  отвечает составному ядру  $^{236}\text{U}$ .

Впоследствии начальная эллипсоидальная форма ядра при рассмотрении деления использовалась также в работах [52, 53] с надеждой объяснить асимметрию спектра масс осколков деления.

На рис. 7 представлен спектр энергий нейтронов, испускаемых при делении  $^{236}\text{U}$ , измеренный в работе [54] одним из авторов работы [50]. Этот спектр согласуется с гипотезой об испускании нейтронов из возбужденных, быстро движущихся осколков деления. Максимум распределения лежит при энергии 0,8 МэВ. В сторону больших энергий кривая спадает экспоненциально.

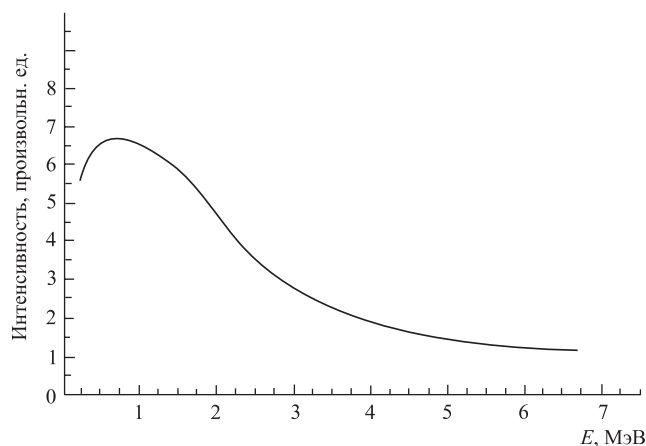


Рис. 7. Спектр нейтронов деления

Аналогичными зарубежным исследованиям энергетического спектра нейтронов, как следует из обзора [29, с. 77], явились работа Ю. С. Замятина и Г. Н. Флерова, а также работа К. Н. Мухина, оформленные как отчеты АН СССР в 1949 г. Экспериментальные точки спектров нейтронов, полученные

в этих исследованиях, накладываются на аппроксимирующую кривую типа  $E \sim (\exp - E) \operatorname{sh} (2E)^{1/2}$ .

Распределение осколков по массовым числам при делении ядра  $^{235}\text{U}$  тепловыми нейтронами [55] и нейтронами с энергией 14 МэВ [56] приведено на рис. 8. Нейтроны с энергией 14 МэВ имеют место при взрыве термоядерной бомбы и возникают в реакции  $^2\text{H} + ^3\text{H} = ^4\text{He} + n$ . На рисунке видно стремление к симметричному по массам делению при повышении энергии возбуждения делящегося ядра. Наиболее вероятны при делении  $^{235}\text{U}$  тепловыми нейтронами цепочки ядер с массовыми числами  $A = 95$  и  $A = 141$ . Наиболее вероятными химическими элементами, образующимися непосред-

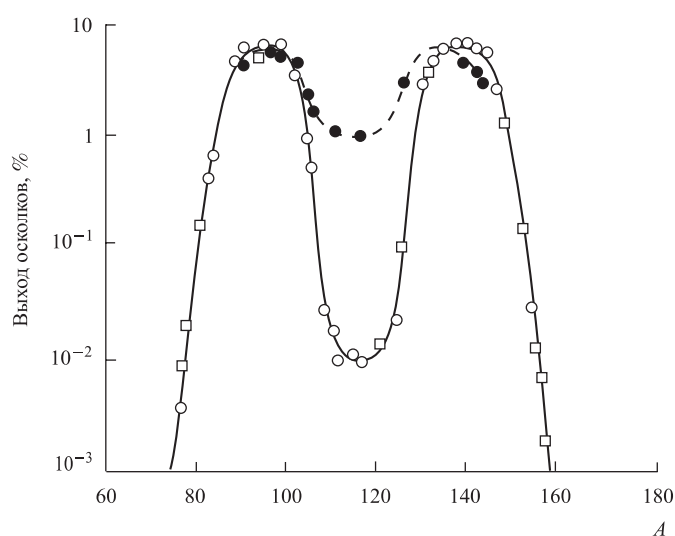


Рис. 8. Распределение по массовым числам осколков деления  $^{235}\text{U}$  тепловыми нейтронами (сплошная линия) и нейтронами с энергией 14 МэВ (штриховая линия)

ственно в момент деления ядра  $^{235}\text{U}$  тепловыми нейтронами в этих двух массовых цепочках, связанных последовательностью  $\beta^-$ -распадов, оказываются элементы с  $Z = 36$  и  $Z = 56$ , т. е. нуклиды  $^{95}\text{Kr}$  и  $^{141}\text{Ba}$ . Это следует из найденного, в основном эмпирически, правила Гленденина–Паппаса, устанавливающего равенство длин цепочек последовательных  $\beta^-$ -распадов для первичных легкого и тяжелого осколков деления [57, 58]. В этом случае дефект массы равняется  $\delta m_0 = 0,197$  а. е. м., что отвечает выделению ядерной энергии  $Q = 185$  или 0,74 МэВ на единицу атомной массы начальных участников реакции.

Взаимная кулоновская энергия двух осколков  $^{95}\text{Kr}$  и  $^{141}\text{Ba}$  в точке разрыва делящегося ядра  $^{236}\text{U}$ , определяющая суммарную кинетическую энергию

двух осколков деления, равняется 170 МэВ. То, что электростатическая энергия двух касающихся друг друга осколков деления до их разлета оказывается несколько меньше полной энергии, выделяемой при делении, является весьма важным обстоятельством. Это обуславливает возможность некоторого внутреннего возбуждения осколков при делении, обеспечивающего эмиссию из осколков вторичных нейтронов.

В 1962 г. в ЛЯР ОИЯИ в ходе экспериментов по синтезу элемента с атомным номером 104 обнаружили, что ядро  $^{242}\text{Am}$  испытывает деление с периодом полураспада  $\sim 14$  мс [59]. Этот период полураспада нельзя было отнести ни к вынужденному делению, характеризующему периодом времени меньше  $10^{-16}$  с, ни к спонтанному делению  $^{242}\text{Am}$  из основного состояния ( $T_{1/2} = 141$  год). Авторы статьи предположили, что спонтанное деление убыстряется и это вызвано тем, что ядра америция имеют начальную форму сплюснутого эллипсоида. Позднее О. Бор и Г. Н. Флеров предложили интерпретировать это интереснейшее явление как изомерию формы ядра [60].

Несомненно, что в списке авторов первой работы по изомерам деления [59] первой должна была бы стоять фамилия Г. Н. Флерова, однако он, как и И. В. Курчатова, не захотел «затенять» молодых исследователей и отказался от авторства в этой работе.

Открытие деления из метастабильного состояния с начальной сильно деформированной формой ядра стимулировало возникновение нового теоретического подхода, разработанного В. М. Струтинским [61], к проблеме влияния структуры ядерных уровней на деление. Автором был предложен метод вычисления микроскопической добавки к макроскопическому значению энергии деформации ядра, определяемой усредненной энергией одночастичных нуклонных уровней. Этой поправкой не только уточнен квадрупольный момент основного состояния ядра, но и выявлены так называемые осцилляции барьера для деления по мере роста деформации ядра.

Теоретические представления, лежащие в основе модели делящихся изомеров, привели к предсказанию повышенной стабильности сверхтяжелых ядер в области атомного номера  $Z = 114$ . Это предсказание блестяще подтвердилось в экспериментах по синтезу сверхтяжелых элементов с  $Z = 110, 112, 114, 115, 116$  и  $118$ , осуществленных Ю. Ц. Оганесяном (см., например, [62]) как продолжение экспериментов Г. Н. Флерова, проведенных в 1963–1970 гг., в результате которых были получены новые трансфермиевые элементы с  $Z = 102–107$ .

В методе В. М. Струтинского важен выбор способа описания формы деформирующегося в процессе деления ядра. Наряду с начальной сферической конфигурацией ядра — жидкой каплей, пригодной для описания малых деформаций ядра при делении, появились описания деформации ядра, основанные на представлении начальной формы ядра эллипсоидом, возмущенным сфероидом, двухцентровой моделью, в большей мере пригодных для предста-



вления больших деформаций ядра. В работе [63] было показано, что овалы Кассини — наиболее удобная однопараметрическая замкнутая кривая, достаточно хорошо описывающая форму делящегося ядра вплоть до его разрыва на два осколка. В работах Пашкевича [64] овалы Кассини были дополнены серией сферических функций, позволивших рассматривать деление изомеров со сложными многогорбными барьерами.

В 1966 г. в ЛЯР ОИЯИ Г. Н. Флеровым и другими [65] в реакциях под действием ускоренных тяжелых ионов были синтезированы новые тяжелые нуклиды, испытывающие ранее неизвестное запаздывающее деление. Сущность обнаруженного явления состояла в том, что ядра, например  $^{232}\text{Am}$  и  $^{234}\text{Am}$ , претерпевали  $K$ -захват и их возбужденные дочерние ядра мгновенно делились.

## 7. ОТКРЫТИЕ ПЛУТОНИЯ-239. УРАН-233

Общие закономерности деления, выявленные Бором и Уилером [31] и определяющие возможность деления тяжелых ядер замедленными нейтронами, хотя, как выяснилось потом, для некоторых ядер и не подтвердились, но наводили на мысль о том, что возможный трансурановый нуклид  $^{239}\text{94}$  будет делиться нейтронами всего спектра, начиная с тепловых. В пользу такого заключения было то, что фактор делимости  $Z^2/A$ , равный 36,8 для ядра  $^{240}\text{94}$ , был выше, чем для  $^{236}\text{U}$  (35,9), и ядро  $^{239}\text{94}$  содержало нечетное число нейтронов, обуславливающее повышенную энергию связи следующего нейтрона в ядре. Таким образом, открывалась новая возможность осуществления цепной реакции деления.

Первым идентифицированным изотопом элемента с  $Z = 94$  был нуклид с массовым числом 238, полученный в результате реакции  $^{238}\text{U} + ^2\text{H} = ^{238}\text{Np} + 2n$ , осуществленной под действием ускоренных на циклотроне дейтронов до энергии 16 МэВ, и последующего  $\beta$ -распада:  $^{238}\text{Np} = ^{238}\text{Pu} + \beta$  [66]. Позднее авторы открытия нового элемента назвали его плутонием, продолжая начатую при открытии нептуния аналогию с названиями планет Солнечной системы. Весьма символично, что Плутон в античной мифологии — бог темного подземного мира, владыка царства теней умерших.

В 1941 г. Сиборг и др. [67] выделили и идентифицировали  $^{239}\text{Pu}$  как дочерний продукт  $\beta$ -распада из очень интенсивного препарата  $^{239}\text{Np}$ , полученного в результате облучения примерно 1,2 кг гексагидрата азотнокислого уранила нейтронами, образующимися при взаимодействии дейтронов с энергией 16 МэВ с бериллиевой мишенью. Пришлось затратить в целом 3500 мкА · ч тока дейтронов, чтобы получить достаточно активный препарат  $^{239}\text{Np}$ .

В работе [67] было также установлено, что  $^{239}\text{Pu}$  (препарат содержал 0,5 мкг вещества) делится тепловыми нейтронами и что сечение деления

этими нейтронами несколько больше, чем у  $^{235}\text{U}$  (750 б). Это означало, что, осуществив процесс получения  $^{239}\text{Pu}$  в промышленном масштабе путем облучения урана нейтронами, можно его выделить из облученного урана простым химическим способом без использования трудоемких газодиффузионного, центрифужного или электромагнитного методов изотопного выделения  $^{235}\text{U}$  из естественного урана.

«За открытие в области химии трансурановых элементов» МакМиллан и Сиборг были удостоены в 1951 г. Нобелевской премии по химии. МакМиллан к тому же получил в 1963 г. вместе с В. И. Векслером международную премию «Атом для мира» за разработку принципа автофазировки заряженных частиц при их ускорении.

Аналогичное внимание привлек к себе и другой нуклид —  $^{233}\text{U}$ , который также имеет большое сечение деления тепловыми нейтронами (530 б) и искусственно получается с помощью нейтронов путем облучения ими естественного тория:  $^{232}\text{Th} + n = ^{233}\text{Th}$ ,  $^{233}\text{Th} = ^{233}\text{U} + \beta$ , а затем выделяется из облученной ториевой мишени химическим методом.

## 8. ОСНОВЫ ТЕОРИИ ЦЕПНЫХ РЕАКЦИЙ ДЕЛЕНИЯ ТЯЖЕЛЫХ ЯДЕР И ИХ ОСУЩЕСТВЛЕНИЕ

Цепная реакция деления тяжелых ядер может протекать в двух вариантах: как управляемая и поддерживаемая на одном уровне интенсивности и как разветвляющаяся реакция взрывного типа с прогрессивно возрастающей интенсивностью. Первая попытка в СССР вызвать цепную реакцию деления ядер урана была предпринята Г. Н. Флеровым в самом начале 1940-х гг. Об этом событии со слов Г. Н. Флерова пишет В. Станцо в журнале «Химия и жизнь» [68], к которому Г. Н. Флеров был привязан, поскольку «видел в... журнале некое явление отечественной культуры, умудрявшееся и в беспросветные годы как-то противостоять дорвавшейся до высоких сфер серости». Хотя этот опыт имел отрицательный результат, но он был не менее важен, чем другие опыты по осуществлению цепных реакций деления тяжелых ядер с положительным исходом. Ожидание некоей опасности в этом эксперименте не было лишено оснований из-за полной неизвестности, при каких условиях и как интенсивно пойдет цепная реакция деления.

**8.1. Цепная реакция деления на тепловых нейтронах.** В середине 1920-х гг. Н. Н. Семенов создал новое научное направление — химическую физику, нацеленную на исследование физических процессов в химических реакциях. Его работы привели к новому пониманию механизма разветвленных цепных химических реакций. В 1956 г. Семенов и Хиншелвуд (Великобритания) получили Нобелевскую премию по химии «за исследования в области механизма химических реакций».

Я. Б. Зельдович и Ю. Б. Харитон — сотрудники Н. Н. Семенова — первыми в Советском Союзе применили общую теорию механизма химического горения и взрыва к рассмотрению возможностей протекания цепной самоподдерживающейся ядерной реакции как процесса последовательного деления тяжелых ядер нейтронами, испускаемыми в актах деления.

В статье [69] Я. Б. Зельдович и Ю. Б. Харитон показали, что при облучении природного урана быстрыми нейтронами из-за процессов упругого и неупругого рассеяния нейтронов, снижающих их кинетическую энергию, в закиси-оксида урана или в металлическом уране протекание цепной разветвляющейся реакции деления невозможно даже в бесконечно большой мультиплицирующей среде, когда вылет нейтронов наружу через границы системы отсутствует. В этом случае для осуществления цепного процесса деления необходимо выполнение условия

$$k = \nu(1 - \gamma) > 1, \quad (20)$$

где  $k$  — коэффициент размножения нейтронов, равный отношению числа нейтронов данного поколения к числу нейтронов предыдущего поколения;  $\nu$  — среднее число вторичных нейтронов, сопровождающих один акт деления;  $\gamma$  — вероятность того, что нейтрон в результате взаимодействия с окружающей средой окажется неспособным вызывать деление ядер урана.

В другой статье Я. Б. Зельдовича и Ю. Б. Харитона [70] был рассмотрен процесс деления при замедлении нейтронов от начальной энергии в несколько МэВ до энергии, близкой к тепловой, когда делению подвержены только ядра  $^{235}\text{U}$ , но с существенно большим сечением, изменяющимся по закону  $1/v$ , где  $v$  — скорость нейтрона.

Отрицательным фактором при делении замедляющимися нейтронами является сильное резонансное поглощение нейтронов при снижении их энергии до 25 эВ ядрами  $^{238}\text{U}$ , ведущее к обрыву цепной реакции деления. С учетом этого фактора для цепной реакции деления вместо выполнения условия (20) требуется осуществление условия

$$k = \nu\varphi\theta > 1, \quad (21)$$

где  $\varphi$  — вероятность для нейтрона замедлиться до тепловой энергии, избежав при этом резонансного захвата ядрами  $^{238}\text{U}$ ;  $\theta$  — вероятность для теплового нейтрона быть захваченным именно ядром  $^{235}\text{U}$ .

Исследованиям возможности осуществления ядерной реакции деления в обогащенном изотопе  $^{235}\text{U}$  и в  $^{239}\text{Pu}$  и легководородном гомогенном замедлителе посвящена работа Г. Н. Флерова [71]. Основной задачей этих исследований было определение допустимых критических масс. Для проведения опытов был изготовлен набор сферических сосудов из алюминия и нержавеющей стали. В центре сферического сосуда устанавливался источник нейтронов со

спектром, подобным спектру нейтронов деления. При некотором заполнении сферы поток нейтронов начинал резко возрастать, что означало приближение к критическому объему. Для точного определения критического объема строилась зависимость обратной величины коэффициента умножения нейтронов  $\alpha$  от объема раствора  $V$ , которая более четко выявляла приближение к критическому объему раствора. Эта важная зависимость для различных объемов растворов  $^{235}\text{U}$  и  $^{239}\text{Pu}$  в легкой воде и с урановым отражателем, давшим наилучшие результаты, представлена на рис. 9.

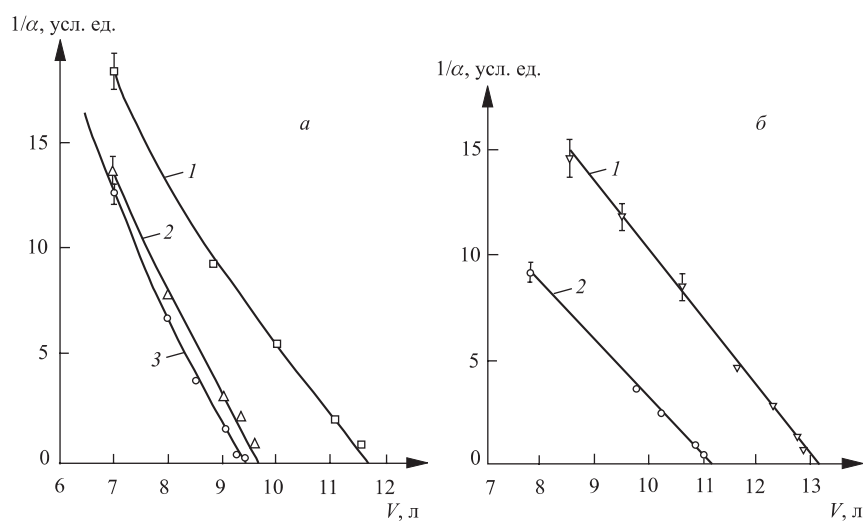


Рис. 9. Зависимость обратной величины коэффициента размножения нейтронов от объема раствора при различных концентрациях делящихся нуклидов: а)  $^{235}\text{U}$ , обогащенный до 70% ( $\square$ , 1 — 92,2 г/л;  $\Delta$ , 2 — 184,3 г/л;  $\circ$ , 3 — 368,7 г/л); б)  $^{239}\text{Pu}$  ( $\nabla$ , 1 — 38,4 г/л;  $\circ$ , 2 — 316,0 г/л)

Основной трудностью в проведенных экспериментах, как пишет Г. Н. Флеров [71], была необходимость тщательного контроля за заполнением сфер раствором. Увеличение объема раствора на 50–100 мм<sup>3</sup> выше критического значения грозило возникновением быстрого лавинного процесса деления ядер и взрывом системы.

Условие (21) может не выполняться для гомогенной (однородной) смеси замедлителя и делящегося вещества. Однако оно может выполняться для гетерогенной (неоднородной) системы с тем же количеством делящегося вещества и замедлителя, если делящееся вещество сосредоточить концентрированно в виде отдельных блоков, чередующихся с замедлителем. В этом случае внутренние ядра блока урана как бы экранируются от участия во вредном про-

цессе радиационного захвата нейтрона, и вероятность радиационного захвата нейтрона ураном в гетерогенной системе снижается по сравнению с гомогенной системой.

В сборнике [72, с. 3] И. Н. Головин пишет: «В 1944 г. пришли к выводу, что для возбуждения цепной реакции в природном уране надо создать пространственную решетку из блоков металлического урана и замедлителя — тяжелого водорода или графита. И. И. Гуревич и И. Я. Померанчук создали теорию кинетики нейтронов в такой неоднородной системе и соответственно теорию процессов протекающих в ней реакций. Г. Н. Флеров и В. А. Давиденко в экспериментах с вольфрамовыми блоками, заменяющими уран, в парафине с помощью слабого нейтронного источника подтвердили справедливость этой теории».

Если следовать теории замедления нейтронов, разработанной Ферми [73] и достаточно подробно изложенной в монографии А. Ахиезера и И. Померанчука [36, с. 336] со ссылкой на первоисточник, то основы теории гетерогенного реактора сводят к следующему.

Упрощая задачу, можно заменить неоднородную плотность нейтронов в блоковой гетерогенной системе сглаженной функцией распределения плотности нейтронов. Плотность тепловых нейтронов  $n(\mathbf{r}, t)$  описывается диффузионным уравнением

$$\partial n / \partial t = D \Delta n - n / \tau_c + q, \quad (22)$$

где  $D$  — коэффициент диффузии тепловых нейтронов;  $\Delta$  — оператор Лапласа;  $\tau_c$  — время жизни нейтрона по отношению к захвату;  $q$  — плотность источников тепловых нейтронов, возникающих в результате замедления вторичных нейтронов до тепловой энергии.

Рассматривается стационарный случай, отвечающий  $\partial n / \partial t = 0$ , и детализируется представление источника нейтронов. Тогда из (22) получается интегродифференциальное уравнение для определения плотности тепловых нейтронов

$$D \Delta n - n / \tau_c + (\varphi / \pi^{3/2} r_0^3 \tau_c) \int Q(\mathbf{r}') \exp [-(\mathbf{r} - \mathbf{r}')^2 / r_0^2] dV' = 0, \quad (23)$$

где  $Q(\mathbf{r}')$  — число быстрых нейтронов, возникающих в единицу времени в единице объема  $V$  около точки  $\mathbf{r}'$  внутри системы в результате деления. Решение уравнения (23) ищется путем разложения искомой функции  $n(r)$  в ряд Фурье по гармоническим пространственным функциям. Тогда, например, конечное решение для максимального критического значения ребра кубической реакторной системы на тепловых нейтронах дается формулой  $a = \pi [3(D\tau_c + r_0^2)/4]^{1/2} / (k - 1)^{1/2}$ , из которой следует, что критические линейные размеры системы  $a$  с самоподдерживающейся цепной реакцией деления обратно пропорциональны  $(k - 1)^{1/2}$ .

Как сообщает П. Э. Немировский [74, с. 81]: «Впервые такой расчет был проведен А. Б. Мигдалом и Г. И. Будкером». Дальнейшее развитие теории цепных реакций деления было сделано в СССР в работах И. Я. Померанчука, А. Д. Галанина и С. М. Фейнберга.

Первый в мире ядерный реактор («nuclear pile» — ядерная куча), называвшийся ранее в литературе на русском языке «котлом», был сооружен в США на теннисном корте под бетонными трибунами Чикагского стадиона и запущен 2 декабря 1942 г. (под руководством Ферми) в виде критической гетерогенной системы из природного урана и графита. В первом реакторе было размещено 52 т природного урана в форме прямоугольных параллелепипедов массой 2 кг каждый, расположенных на расстоянии 21 см друг от друга в графитовом замедлителе массой 385 т. По форме реактор представлял собой эллипсоид вращения диаметром 9 м и высотой 6 м, расположение топливных стержней — горизонтальное. Общий вес реактора — более 1400 т.

В первом сеансе реактор был доведен до мощности 40 Вт и затем заглушен путем введения в реактор полос из кадмия, хорошо поглощающего тепловые нейтроны.

И. В. Курчатов, как сказано в [75], констатировал, что «до мая 1945 г. в СССР не было надежды осуществить уран-графитовый котел, т. к. в нашем распоряжении было только 7 т окиси урана. В середине прошлого года (1945 г.) т. Берия направил в Германию специальную группу работников Лаборатории № 2 и НКВД во главе с тт. Завенягиным, Махневым и Кикоиным для розысков урана и уранового сырья. В результате большой работы группа нашла и вывезла в СССР 300 т окиси урана и его соединений, что серьезно изменило положение не только с уран-графитовым котлом, но и со всеми другими урановыми сооружениями».

Для создания уран-графитового реактора необходимо было иметь помимо урана еще значительное количество графита высокой чистоты, т. е. без примеси химических элементов, активно поглощающих нейтроны. Совместными усилиями инженеров и физиков, обеспечивших методы анализа различных примесей в графите и измерения ядерных свойств образцов графита, эта задача была решена. Критерием пригодности графита служило значение сечения поглощения нейтронов, отнесенное ко всей массе графита, не более  $\sigma_c = 5 \cdot 10^{-27} \text{ см}^2$  при значении сечения поглощения собственно графитом  $\sigma_c = 3 \cdot 10^{-27} \text{ см}^2$ .

В докладах В. С. Фурсова [76] и И. Ф. Жежеруна [77] говорится о первом в Советском Союзе исследовательском ядерном реакторе. В качестве конструктивных элементов для реактора и отражателя нейтронов были приняты графитовые бруски с размерами  $100 \times 100 \times 600$  мм. В блоках графита имелись отверстия для размещения урановых цилиндрических блоков. Внешне реактор представлял собой цилиндрический штабель из блоков общим диаметром 380 см со сферическим закруглением сверху и высотой около 7 м.

Для сооружения реактора потребовалось 50 т естественного урана и 400 т графита.

Запуску первого исследовательского реактора предшествовали опыты по измерению коэффициента  $k$  при различных расстояниях между блоками из металлического урана и при различных значениях диаметра блоков. На рис. 10, взятом из доклада [77], представлены результаты измерений превышения коэффициента размножения нейтронов над единицей для различных вариантов уран-графитовой решетки. В окончательном варианте кладки реактора была принята кубическая решетка с ребром 200 мм, в узлах которой располагались цилиндрические урановые блоки диаметром 30–40 мм.

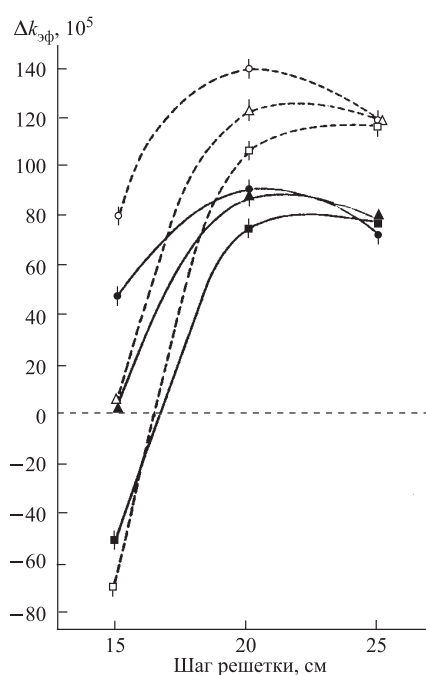
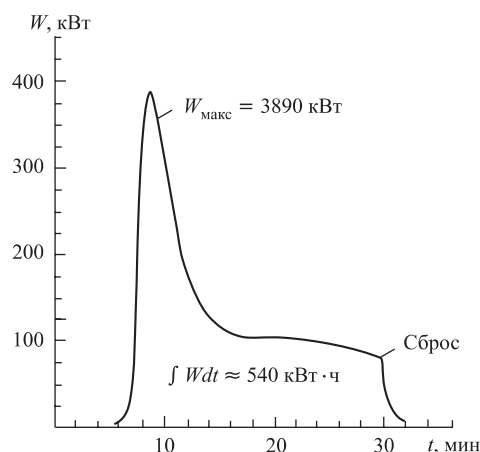


Рис. 10. Результаты измерения превышения коэффициента размножения нейтронов над единицей  $\Delta k = k - 1$  при различных параметрах уран-графитовых решеток: светлые кружки, треугольники, квадраты — для урановых блочков с диаметром 30, 35 и 40 мм в алюминиевой оболочке толщиной 1 мм; темные символы — для тех же блочков, но с концентрическим слоем парафина толщиной 2 мм

Хотя в первом исследовательском реакторе не был предусмотрен отвод выделяющейся при делении тепловой энергии, тем не менее за счет большой теплоемкости урана и графита удавалось на короткое время поднимать мощность реактора до нескольких тысяч киловатт при обычно выделяемой

мощности порядка 10 Вт. При разогреве урана и графита коэффициент размножения нейтронов уменьшался и мощность реактора самопроизвольно падала, обеспечивая, таким образом, безопасность работы. Саморегулирование реактора при разогреве иллюстрируется рис. 11.

Рис. 11. Саморегулирование реактора при его разогреве со временем при большом подъеме мощности. Участки кривой последовательно отражают следующие процессы: быстрый подъем мощности при увеличении реактивности, максимум мощности в точке самокомпенсации реактора ( $k = 1$ ), быстрый спад мощности в результате разогрева урана, медленный спад мощности в результате разогрева графита, принудительная остановка реактора



Первый в СССР исследовательский ядерный реактор Ф-1 (физический первый) был запущен в 19-00 ч. 25 декабря 1946 г. в Лаборатории № 2 АН СССР под руководством и при непосредственном участии И. В. Курчатова. Лаборатория № 2 была организована решением от 12 апреля 1943 г. АН СССР как центр по руководству научной и технической деятельностью по созданию отечественного ядерного оружия. Начальником лаборатории был назначен И. В. Курчатов. В свою очередь, распоряжение АН СССР основывалось на постановлении Государственного комитета обороны «Об организации работ по урану», подписанном 28 сентября 1942 г. И. В. Сталиным.

Интересен вопрос, с чем связано наименование созданной новой лаборатории — «Лаборатория № 2». Как пишет первый заместитель И. В. Курчатова И. Н. Головин [78, с. 134]: «В июле 1943 г. наши войска ... освободили Харьков. К. Д. Синельников тотчас же едет туда, в полуразрушенные немцами лаборатории и, согласовав план действий с Курчатовым, намечает пути и сроки их восстановлений. Решено восстановить прежде всего электростатические генераторы и начать измерения элементарных констант, определяющих условия возбуждения цепных реакций. Лабораторию Синельникова назвали «Лаборатория № 1». Так назвали Харьковский физико-технический институт, который был известен еще до Отечественной войны своими достижениями в области ядерной физики и техники электростатических ускорителей. И. В. Курчатов дружески-родственно относился к К. Д. Синельникову (его жена Марина Дмитриевна была сестрой его лучшего друга юности Кирилла



Синельникова). О своей последней поездке в ХФТИ, в результате которой был намечен обширный план развертывания там термоядерных исследований, И. В. Курчатов рассказал в своей большой статье, опубликованной в газете «Правда» в день его смерти 7 февраля 1960 г.

Опыт, полученный при эксплуатации реактора Ф-1, был учтен при проектировании и постройке следующего реактора для технических и физических исследований (РТФ), в котором для создания высокой удельной мощности использовался уран, обогащенный изотопом  $^{235}\text{U}$ , графитовый замедлитель и охлаждающая реактор вода. Активная зона реактора РТФ выполнена в форме цилиндра диаметром и высотой 1 м, его мощность достигала 10 МВт, плотность потока нейтронов в центре реактора равна  $8 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ . Этот опыт послужил также основой для создания и первого промышленно-энергетического реактора А на Южном Урале (Челябинск-65, в настоящее время г. Озерск) мощностью 100 МВт, использовавшегося как в энергетических целях, так и для наработки плутония. Этот реактор описан в докладе В. И. Меркина [79]. Реактор А запущен на полную мощность 22 июня 1948 г. и лишь в марте 1949 г. после устранения ряда аварий выведен на режим нормальной эксплуатации. 16 июня 1987 г. в работоспособном состоянии реактор остановлен в соответствии с международным соглашением.

В 1951 г. было решено начать в Физико-энергетическом институте (г. Обнинск) проектирование реактора для сугубо энергетических целей, основываясь на реакторе с обогащенным до 5 % урановым топливом, графитовым замедлителем и водяным теплоносителем (научный руководитель проекта — Д. И. Блохинцев, главный конструктор реактора — Н. А. Доллежал). Сооружение реактора продолжалось всего 2,5 года, и 27 июня 1954 г. первая в мире ядерная электростанция, иначе называемая атомной электростанцией (АЭС), дала первый электрический ток [80].

Первая АЭС представляла собой однореакторную установку, во втором теплоснимающем контуре которой вырабатывался перегретый водяной пар с давлением 12,5 атм и температурой 260 °С. Пар поступал на турбину, на валу которой был установлен электрогенератор мощностью 5 МВт. Коэффициент полезного действия (КПД) первой в мире АЭС оказался весьма скромным — 17 % (при 30 % и более в современных АЭС). В настоящее время реактор первой АЭС демонтирован и в здании станции организован музей ядерной энергетики.

В 1967 г. был одобрен проект уран-графитового реактора с водяным охлаждением типа РБМК — реактор большой мощности (более одного ГВт) канальный, разработанный под научным руководством А. П. Александрова и С. М. Фейнберга. В 1973 г. состоялся пуск первого энергоблока реактора этого типа на Ленинградской АЭС, который по прошествии 30-летнего срока эксплуатации 21 декабря 2003 г. был остановлен и вопрос о его дальнейшей судьбе решается.

Всего построено и введено в эксплуатацию 14 энергоблоков с реакторами типа РБМК. После известной Чернобыльской аварии (1986 г.) проект доработан до международного уровня требований ядерной безопасности. Подтверждением этого стало завершение строительства и начало эксплуатации третьего реактора этого типа на Смоленской АЭС в 1990 г., достройка блока № 5 на Курской АЭС.

В настоящее время в восточно-европейских странах (в Болгарии, Чехии, Словакии и др.) имеется 24 реактора — кандидата на досрочное закрытие. Это реакторы типа РБМК-1500 и ВВЭР-440/230. В общественном сознании на Западе распространено мнение, что эти бескорпусные реакторы являются опасными.

В 1953 г. в СССР под руководством А. П. Александрова, как следует из публикации [81], развернулись работы по созданию уран-водо-водяных реакторов (словосочетание «водо-водяных» означает, что легкая вода служит одновременно как для замедления нейтронов, так и для снятия тепла с урановых твэлов) для подводных лодок и ледоколов. В то время имелись только результаты исследований Г. Н. Флерова по уран-водяным системам [71], и поэтому было принято решение о создании в первую очередь полномасштабной уран-водо-водяной критической сборки. В результате этих работ в 1960 г. в СССР был построен и спущен на воду первый в мире ледокол «Ленин» с ядерно-энергетической силовой установкой мощностью 40 тыс. л. с., обеспечивший проводку судов через паковые льды Северного Ледовитого океана.

Другая возможность осуществления цепного процесса деления естественного урана на тепловых нейтронах реализована в результате применения в качестве замедлителя нейтронов тяжелого водорода — дейтерия — в гетерогенной системе с ядерным топливом.

Исследования по реакторам с тяжеловодным замедлителем начались в СССР в 1945 г. под руководством А. И. Алиханова в Лаборатории №3 АН СССР (позднее — Теплотехническая лаборатория АН СССР, а ныне Институт теоретической и экспериментальной физики). В докладе Н. А. Бургова [82] рассмотрены исследования в указанной выше лаборатории по измерению важной величины  $\varphi$  — вероятности того, что нейтрон избежит захвата при замедлении до тепловых энергий в тяжелой воде реактора (см. формулу (21)). Эта величина оказалась равной  $\varphi = 0,879 \pm 0,008$  для системы из урановых стержней диаметром 14 мм и при расстояниях между стержнями в тяжеловодной решетке 58 мм.

В апреле 1949 г. опытный тяжеловодный реактор был запущен и на нем были проведены критические эксперименты, которые позволили выбрать оптимальную схему загрузки аналогичного промышленного ядерного реактора, сооружаемого на Южном Урале [83]. По сравнению с уран-графитовыми реакторами тяжеловодный реактор был значительно сложнее, но требовал

приблизительно в десять раз меньшего количества металлического урана. В то время как первый промышленный уран-графитовый реактор содержал в активной зоне 150 т металлического урана, первый промышленный тяжеловодный реактор, построенный в Челябинске-40, имел исходную загрузку около 20 т урана при одинаковой мощности реакторов. Однако достаточно большую трудность представляло получение в нужных количествах тяжелой воды.

В настоящее время ядерные электростанции на тепловых нейтронах заняли соответствующие места в энергетике ряда стран: так, по данным бюллетеня МАГАТЭ [84] по состоянию на ноябрь 2002 г. выработка электроэнергии на АЭС составила: в Литве — 77,6 %, во Франции — 77,1 %, в Бельгии — 58,0 %, в Словакии — 53,4 %, на Украине — 46,0 %, в Швеции — 43,9 %. В Великобритании, США и Российской Федерации эта выработка составляет от 25 до 15 %.

О состоянии и перспективах развития ядерной энергетики в России можно судить по статье первого заместителя министра РФ по атомной энергии М. Солонина [85], написанной по материалам его выступления на международном ядерном конгрессе ENC-2002 (2002 г., Лилль, Франция). Краткое изложение этой статьи дается ниже.

Производство электроэнергии на АЭС России в 2001 г. превысило 135000 ГВт·ч, что составило уже 15 % от общего производства электрической энергии. В ближайшие годы планируется построить в РФ ряд новых блоков, состоящих из ядерного реактора, парогенератора, паровой турбины и электрогенератора на действующих АЭС. Знаковым событием стал ввод после восьмилетнего периода застоя, вызванного Чернобыльской аварией и перестроечным экономическим спадом, нового блока на Ростовской (Волгодонской) АЭС. На очереди целый ряд новых блоков с разной степенью готовности. Это, например, блоки на Калининской — 3-й и 4-й, Курской — 5-й, Ростовской — 2-й, Балаковской — 6-й и на других АЭС с суммарной мощностью 10 ГВт.

В максимальном варианте установленные мощности АЭС в РФ могут быть доведены к 2020 г. до 40 ГВт(э) с годовой энерговыработкой около 350 тыс. ГВт·ч электроэнергии. Техническую и технологическую основу этой государственной программы составляют реакторы деления типа ВВЭР с мощностью более 1 ГВт, имеющие современную конструкцию, высокий уровень безопасности и конкурентоспособные на внешнем рынке.

В настоящее время в США работы по усовершенствованию ядерных реакторов проводятся по программе «Nuclear Energy 2010», куда включена совместная (с участием России) разработка газотурбинного модульного гелиевого реактора. В США принята программа национального строительства серии ядерных электростанций на ближайшие 30 лет [86]. В качестве одной из таких типовых станций предлагается проект IRIS (International Reactor Innovative and Secure) — малогабаритный высокобезопасный и экономич-

ный легководный реактор деления под повышенным давлением охлаждающей воды, заключенный вместе с парогенератором в стальной толстостенный корпус относительно малого размера (диаметр корпуса равен 25 м вместо 40 м в современных ядерных реакторах). Это позволяет с высокой степенью вероятности исключить пять из возможных шести типов ядерных реакторных аварий, включающих в себя радиоактивную, реактивную и другие типы аварий вплоть до диверсионного акта. Мощность атомной электростанции до 1,5 ГВт создается единичными блоками по 100–300 МВт при стоимости 1 кВт установленной мощности в 1000 долларов. Продолжительность кампании реактора между плановыми вскрытиями и перегрузками топлива составит 5–8 лет.

Другая серия реакторов будет использовать газовое гелиевое охлаждение и газовую турбину, работающую при температуре 900 °С и обеспечивающую КПД при преобразовании тепловой энергии в электрическую выше 43 % вместо 31 % в современных паровых турбинах. Все основные элементы атомной электростанции — реактор, газовый теплосъемник, газовая турбина и электрогенератор располагаются в закрытом стальном кожухе. Выгрузка и пополнение реактора ядерным топливом по мере его выгорания производится через специальный шлюз.

Конструктивной особенностью таких реакторов является насыпная «галечная» подстилка (pebble-bed) из шариков — топливных элементов, через слой которых продувается охлаждающий газ — двуокись углерода или гелий. Каждый шарик содержит ядро из двуокиси урана диаметром 0,5 мм, покрытое несколькими защитными слоями из пористого или пиролитического графита и карбида кремния [87].

**8.2. Цепная реакция деления на быстрых нейтронах — размножение ядерного горючего.** Особой разновидностью реакторов ядерного деления является реактор-бридер, или реактор-конвертер, в котором, наряду с выгоранием реакторного топлива  $^{239}\text{Pu}$  или  $^{235}\text{U}$ , происходит накопление  $^{239}\text{Pu}$  или  $^{233}\text{U}$  в результате захвата нейтронов соответственно ядрами  $^{238}\text{U}$  или  $^{232}\text{Th}$  и двух последующих  $\beta$ -распадов. Таким образом, непригодные в качестве реакторного топлива в реакторах на тепловых нейтронах изотопы  $^{238}\text{U}$  и  $^{232}\text{Th}$  превращаются в реакторное горючее.

Два противоположно направленных процесса — выгорание первичного реакторного топлива, например  $^{239}\text{Pu}$ , и образование вторичного ядерного горючего — того же  $^{239}\text{Pu}$  в результате захвата нейтронов ядрами изотопа  $^{238}\text{U}$ , размещенного в бланкете — обкладке реактора, определяют коэффициент воспроизводства (КВ) реакторного горючего. Для этого воспроизводства используется только излишек нейтронов, который остается сверх тех нейтронов, которые необходимы для осуществления цепной реакции деления.

В докладе [76] отмечается, что наиболее интересный результат в исследованиях на уран-графитовом реакторе был получен при сравнении энергетиче-

ского хода сечения деления с ходом сечения полного поглощения нейтронов. Из хода этого отношения для ядер  $^{235}\text{U}$  и  $^{239}\text{Pu}$  следовало, что в реакторе на тепловых нейтронах нельзя надеяться на достижение КВ больше единицы. Но по мере использования нейтронов с повышенной энергией появляются основания для воспроизводства ядерного горючего в реакторах. Кроме того, испускание нейтронов при делении быстрыми нейтронами ядер  $^{238}\text{U}$ , размещенного в blankets реактора, дает заметный дополнительный вклад в воспроизводство  $^{239}\text{Pu}$ .

По словам П. Э. Немировского [74, с. 80], Г. Н. Флерову «принадлежат две весьма важные идеи: необходимость учета размножения на быстрых нейтронах и возможность построения бридера. Г. Н. Флеров предложил не только саму идею бридера, но совместно с И. И. Гуревичем рассмотрел и первый реальный вариант такого реактора в виде маленького аппарата с  $^{239}\text{Pu}$ , окруженного решеткой из натурального урана, в котором происходит накопление плутония».

Соответствующие отчеты Г. Н. Флерова и И. И. Гуревича на тему «Саморазмножающиеся системы для производства плутония» (более сорока страниц), датированные июлем 1946 г., и другие предложения, связанные с этими отчетами, можно найти в архивных материалах Курчатковского института, опубликованных в 1998 г. [88, с. 103]. Действие системы направлено на то, чтобы количество  $^{239}\text{Pu}$ , рожденное в мультипликаторе, превышало количество плутония, сгоревшее в генераторе нейтронов.

Заметим, что в ядерных реакторах деления на тепловых нейтронах, использующих в качестве горючего  $^{235}\text{U}$ , на 1 кг сгоревшего  $^{235}\text{U}$  образуется всего  $\sim 0,5$  кг  $^{239}\text{Pu}$ .

Принципиальные особенности предложенной сильно разнородной системы состоят в том, что активно делящийся материал, сосредоточенный в центре, используется наилучшим образом, а в протяженном мультипликаторе из природного урана возможен хороший теплосъем и, следовательно, возможны большие плотности потока нейтронов для наработки плутония.

Авторы [88] обращают также внимание на такую важную особенность реактора, как возможность отдельного выделения нужного оружейного изотопа  $^{239}\text{Pu}$  и, как его называют, второсортного изотопа  $^{240}\text{Pu}$  путем использования «большой неравномерности в плотности энерговыделения в мультипликаторе, ... во внутренней и внешней зонах».

Заметим, что наличие в ядерной взрывчатке  $^{239}\text{Pu}$  ( $T_{1/2\text{ сп. дел}} = 5,5 \times 10^{15}$  лет) заметно более короткоживущего по отношению к спонтанному делению второсортного изотопа  $^{240}\text{Pu}$  ( $T_{1/2\text{ сп. дел}} = 1,2 \cdot 10^{11}$  лет) существенно ограничивает возможную критическую массу ядерного оружия.

Согласно данным В. И. Субботина [89]  $^{239}\text{Pu}$  в соответствии со стандартом США подразделяется на следующие типы: сверхчистый, содержащий всего 2–3 % примеси  $^{240}\text{Pu}$ , оружейный — с 3–7 % примеси, топливный —

с 7–19 % примеси, реакторный — с более 19 % примеси изотопа  $^{240}\text{Pu}$ . В 1962 г. в США была изготовлена и испытана ядерная бомба, начиненная реакторным плутонием, для определения влияния примеси  $^{240}\text{Pu}$  на силу ядерного взрыва.

В отчете Г. Н. Флерова и И. И. Гуревича [88], как это иллюстрируется расчетами на основе полученных формул, показано, что возможен  $K_B = 2,5–3,5$ .

Позднее, в 1954 г., это предложение детально обсуждалось на семинаре в ЛИПАН по докладу Г. Н. Флерова с участием ведущих специалистов по теории ядерных реакторов. Рассматриваемое предложение вызвало критические замечания присутствовавшего на семинаре С. М. Фейнберга, усомнившегося в достижимости указанного выше значения  $K_B$ .

По-видимому, обсуждение на семинаре подтолкнуло Г. Н. Флерова предложить для воспроизводства ядерного горючего другой генератор нейтронов — реакцию рождения нейтронов в тяжелой мишени под действием ускоренных до высокой энергии протонов. Эту идею Г. Н. Флеров подробно изложил в докладе «Использование заряженных частиц для энергетических целей» на семинаре в ЛИПАН, состоявшемся, как записано в моем рабочем журнале № 1639, 26 октября 1955 г.

Следуя В. И. Субботину [89], скажем, что первый в мире экспериментальный реактор-размножитель на быстрых нейтронах с плутониевым топливом, ртутным замедлителем и теплоносителем был сооружен в США в 1945 г. Тепловая мощность реактора составляла 25 кВт. Для исследования проблемы возможного расширенного воспроизводства ядерного топлива ( $K_B > 2$ ) в реакторах на быстрых нейтронах в Физико-энергетическом институте в Обнинске в начале 1950-х гг. были начаты соответствующие эксперименты. В 1956 г. в СССР был создан аналогичный американскому реактор, но с тепловой мощностью 100 кВт. Далее в СССР последовало сооружение серии реакторов на быстрых нейтронах. Наибольшую мощность (600 МВт) из них имеет промышленный реактор БН-600 (БОР-600), построенный на площадке Белоярской АЭС: теплоноситель — расплавленный натрий, трехконтурная баковая, а не петлевая, система охлаждения, дающая возможность иметь запас теплоносителя для охлаждения реактора в случае аварии.

Современные реакторы используют уран с искусственно обогащенным содержанием  $^{235}\text{U}$ . В процессе обогащения на каждый килограмм произведенного обогащенного урана идет в отходы производства в среднем 8 кг урана, обедненного ураном-235, т. е. с содержанием  $^{235}\text{U}$  менее природного. Поэтому большая доля всего урана, использованного для изготовления реакторных топливных элементов и ядерного оружия, лежит в настоящее время в отвалах обедненного урана, и вот уже 30 лет идет спор о том, рассматривать ли этот уран как ненужные отходы (пригодные только для изготовления бронбойных снарядов с тяжелым урановым сердечником) или считать ядерной начинкой будущих реакторов-бридеров на быстрых нейтронах.

Лауреатами Российской премии «Глобальная энергия» в 2004 г. «за разработку физико-технических основ и создание энергетических реакторов на быстрых нейтронах» стали Л. Дж. Кох (США) и академик РАН Ф. М. Митенков.

Кох, пионер в области создания бридеров, в течение 24 лет занимался разработкой реакторов на быстрых нейтронах, один из которых первым в мире дал электрическую энергию. Ф. М. Митенков — создатель действующего реактора на быстрых нейтронах БН-600 и строящегося БН-800, а также компактных, высоконадежных и безопасных энергетических реакторов для атомных ледоколов.

**8.3. Разветвляющаяся цепная реакция деления взрывного типа на быстрых нейтронах.** Одни из первых расчетов цепной реакции деления тяжелых ядер взрывного типа были сделаны Г. Н. Флеровым. Эти расчеты приведены в его письмах И. В. Курчатову от 21 декабря 1941 г. [90, с. 15] и от 7 марта 1942 г. [90, с. 35], а также в написанном Г. Н. Флеровым черновике статьи «К вопросу об использовании внутриатомной энергии» [91, с. 163], датированном 17 февраля – 7 марта 1942 г.

Во многих случаях, как пишет Г. Н. Флеров, для преодоления сил связи вещества при его разрушении существенным является не только количество выделенной энергии  $E$ , но и максимальное значение силы  $F$  при этом достигнутое:  $F = mv/\Delta t = (2Em)^{1/2}/\Delta t$ , где  $m$  — инертная масса вещества и  $E = \delta m_0 c^2$  — выделенная энергия. Особенностью цепных реакций деления является то, что в зависимости от условий их проведения энергия может выделяться или медленно, или же мгновенно за время порядка  $10^{-6}$ – $10^{-7}$  с, как, например, в случае развития «динамитных» реакций деления на быстрых нейтронах. Критерий устойчивости реакции  $q = \nu\sigma_{\text{дел}}/(\sigma_{\text{дел}} + \sigma_{\text{захв}})$  должен быть больше единицы, при этом значения сечений деления и захвата усреднены по всему спектру нейтронов, испускаемых в процессе развития цепи. Только для двух нуклидов  $^{235}\text{U}$  и  $^{231}\text{Pa}$ , как можно предположить, критерий устойчивости при соответствующих размерах системы может быть больше единицы.

Следующим условием, необходимым для эффективного осуществления «быстрой» цепной реакции, является скачкообразное изменение  $q$  от значений, несколько меньших 1, до значений  $q > 1$  (1,15–1,20).

Для оценочных расчетов автор принял, что используется 2,3 кг либо  $^{235}\text{U}$ , либо  $^{231}\text{Pa}$  с плотностью 23. Тогда объем вещества равен  $100\text{ см}^3$ , диаметр сферы 6 см. При использовании, например, трети ядер активного вещества тротиловый эквивалент быстрой цепной реакции деления составит 20000 т.

Для быстрого изменения устойчивости Г. Н. Флеров считает «наиболее целесообразным» использование сжатия активного вещества. Предлагаемая схема, которую мы условно назовем «внутренним» выстрелом, изображена на рисунке» [91, с. 183], который мы воспроизводим на рис. 12. В этой схеме ядерный взрыв инициируется быстрым сближением двух полусферических полукритических масс  $^{235}\text{U}$  в одну сферическую сверхкритическую массу урана под

действием взрыва обычного взрывчатого вещества, расположенного снаружи одной из полусфер (А).

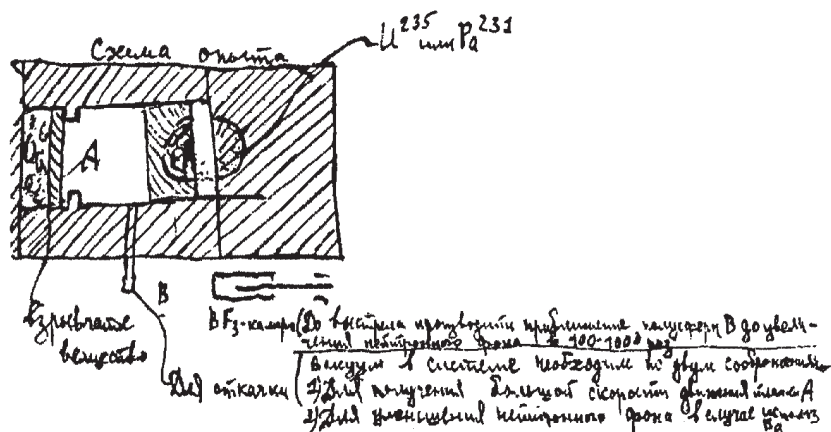


Рис. 12. Схема ядерной бомбы с инициатором типа «внутреннего» взрыва, предложенная Г.Н.Флеровым в письме И.В.Курчатову от 17 февраля – 7 марта 1942 г. «К вопросу об использовании внутриатомной энергии» [91]

Первоначально в качестве конструкции ядерной бомбы Г.Н.Флеровым предлагался пушечный прострельный вариант, в котором пушечный стальной ствол являлся отражателем нейтронов, поддерживающих разветвляющуюся цепную реакцию деления при быстром пролете критической массы урана через ствол: «скорость бомбы 3000 м/с, длина ствола 5–10 м» [90, с. 27].

Впоследствии Г.Н.Флеров по непосредственному поручению И.В.Курчатова проводил первые эксперименты по определению критических условий для иницирования цепной реакции деления взрывного типа на быстрых нейтронах в металлическом плутонии. Ю.С.Замятнин в статье «Воспоминания об участии в атомном проекте» [92, с. 140] пишет: «Весной 1949 г. во Всесоюзном научно-исследовательском институте экспериментальной физики была предпринята первая экспериментальная оценка критической массы металлического плутония. Так как к этому моменту времени количество накопленного плутония было еще мало и находилось далеко от критического значения, результаты этих опытов позволили получить расчетным путем лишь грубую оценку значения критмассы. После того как было наработано достаточное количество плутония, в июне 1949 г., т.е. примерно за 3 месяца до первого испытания оружия, группа Г.Н.Флерова почти в полном составе вместе со всем необходимым оборудованием выехала на место измерений (Челябинск-40)... Это был очень опасный эксперимент. Надо было, с одной сто-



роны, максимально приблизиться к критмассе, с другой — ни в коем случае не достигнуть ее. Тогда все могли бы переоблучиться и погибнуть. . . Но тем не менее Игорь Васильевич смело проводил этот эксперимент, и после того как были оценены значения критмассы, он пошел несколько дальше — решил осуществить некий разгон системы за счет запаздывающих нейтронов, . . . но управляемый разгон. . .».

Первый в истории ядерный взрыв состоялся на испытательном полигоне в США 16 июля 1945 г. Затем последовали бомбардировки японских городов Хиросима и Нагасаки.

В программе ядерных испытаний в Советском Союзе за 41 год (с 29 августа 1949 г. по 24 октября 1990 г.) было проведено 715 ядерных взрывов, из которых 124 взрыва было осуществлено в интересах народного хозяйства страны. Сокращенное наименование советских ядерных бомб — РДС — происходит, как пишут участники создания и испытания ядерного оружия, от первых букв полного их названия «Россия делает сама».

Первое народно-хозяйственное применение ядерного взрыва создало озеро Чаган на Семипалатинском полигоне: взрывом была образована воронка глубиной 90 м, диаметром около 500 м и объемом воды порядка 7 млн куб. м. Кроме этого первого (внутреннего) водоема, за счет перекрытия русла реки насыпной плотиной образовался внешний водоем объемом около 10 млн куб. м. Более полная история «мирных» взрывов и, в частности, их радиационные последствия приведены в работе [93].

Как известно, в качестве ядерной взрывчатки в самом начале осуществления атомного проекта СССР предполагалось использовать или  $^{235}\text{U}$ , или  $^{239}\text{Pu}$ . Для выделения  $^{235}\text{U}$  из природного урана была начата разработка трех возможных физических методов изотопного разделения: газодиффузионного, электромагнитного и центрифужного. Как сказано в докладе [94], в 1946 г. в районе Верх-Нейвинска в Свердловской области (Свердловск-44) под руководством И. К. Кикоина был построен и запущен в эксплуатацию газодиффузионный завод Д-1. «Завод работал, но проектной продукции не выдавал. Был получен уран с обогащением всего лишь 40 %. И. В. Курчатов поручил Л. А. Арцимовичу довести этот уран до бомбовой кондиции на экспериментальной электромагнитной установке в Лаборатории № 2. За месяц ее круглосуточной работы из 40 %-го урана было получено 400 г урана, содержащего от 92 до 98 % урана-235. . . В ноябре 1949 г. . . удалось получить первый продукт 75 %-го обогащения. . . и дообогащить его до 90 % на электромагнитном заводе, созданном под руководством Л. А. Арцимовича на Северном Урале (Свердловск-45). . . В 1950 г. завод Д-1 стал работать нормально. Обогащение конечного продукта ураном-235 было доведено от 75 до 90 % при проектной величине отбора. . . Позднее электромагнитный завод прекратил дообогащение урана и был переключен на разделение стабильных изотопов. . . В 50-е гг. на Урале и в Сибири — в Томске, Красноярске,

Ангарске — была создана мощная газодиффузионная промышленность, полностью удовлетворявшая потребности СССР в обогащенном уране. В 1951 г. была испытана сделанная из урана, обогащенного до 90 % ураном-235, первая урановая бомба. . . В дальнейшем отечественные заводы стали производить также уран слабого обогащения (до 5 %) для атомных электростанций. . . Но газовая диффузия отличается высокой энергоемкостью. Поэтому в СССР одновременно с созданием газодиффузионной промышленности были развиты под руководством И. К. Кикоина газовые центрифуги, . . . открывшие возможности снижения энергоемкости в десятки раз. . . Постепенно на заводах газодиффузионные ступени отключались и демонтировались, а на их место устанавливались каскады газовых центрифуг».

**8.4. Природная цепная реакция деления ядер урана.** 7 июня 1972 г. во Франции при обычном масс-спектрометрическом анализе урана, поступившего на обогатительный комбинат, выяснилось, что содержание  $^{235}\text{U}$  в исходном металле составляет всего 0,717 % вместо обычных для всех минералогических пород на Земле, Луне и внеземных метеоритах 0,720 %. Источником аномального сырья оказался урановый рудник в Окло в Габоне, в Западной Африке, в котором иногда встречались локальные залежи (линзы) двуокиси урана с концентрацией в породе 20–40 % вместо обычных 0,5 % протяженностью до 20 м и толщиной до 1 м. Именно в этих линзах относительное содержание изотопа  $^{235}\text{U}$  оказалось меньше обычного вплоть до 0,44 %.

Изучение геологии залежей урана показало, что месторождение расположено в дельте древней реки, в толще осадочных пород, образовавшихся около двух миллиардов лет назад. В то время относительная концентрация  $^{235}\text{U}$  составляла  $\sim 3\%$ , т. е. столько же, сколько в современном ядерном реакторе с водяным замедлителем. Поэтому каждый раз, когда урановую линзу заливали водой, в ней начиналась самоподдерживающаяся реакция деления до тех пор, пока вода не отступала и выделившееся в результате реакции тепло не испаряло воду. По оценкам, природный реактор в Окло функционировал в таком режиме более полумиллиона лет со средней мощностью приблизительно 25 кВт.

История открытия природного ядерного реактора в Окло, а также современные данные о продуктах спонтанного деления тяжелых ядер в радиоактивных минералах, в литосфере и атмосфере приведены в книге [95].

## 9. ОБЩЕСТВЕННЫЕ ИНИЦИАТИВЫ УЧЕНЫХ-ЯДЕРЩИКОВ

Первые результаты в области деления тяжелых ядер и понимание значения этого явления для высвобождения ядерной энергии в больших количествах (в частности, в военных целях) привели к значительному возбуждению

общественного мнения ученых, существенно повлиявшего на дальнейшее развитие проблемы деления.

**9.1. Первые отклики ученых на открытие деления тяжелых ядер.** Первым физиком, кто попытался публично обратить внимание своих коллег на опасность возможного военного использования деления тяжелых ядер, был Сцилард — венгр по национальности, эмигрировавший в США. В своих экспериментах в Колумбийском университете он видел, что процесс деления урана нейтронами может протекать как цепная реакция взрывного типа с большим выделением энергии. Он также знал, что аналогичными исследованиями деления ядер занимаются ученые в Германии.

В январе–феврале 1939 г. Сцилард пытался склонить Ферми и Жолио к отказу от опубликования работ по делению, но безуспешно. Однако ему удалось через всемирно известного Эйнштейна, также находившегося в эмиграции в США, проинформировать 2 августа 1939 г. президента Ф. Рузвельта о сложившейся ситуации в области возможного использования ядерной энергии. После некоторого периода недоверия к полученной информации в конце концов Ф. Рузвельт распорядился взять под контроль военного министерства исследования по ядерному делению.

В феврале–марте 1940 г. Фриш и Пайерлс подготовили доклад о возможной конструкции ядерной бомбы. Они поставили вопрос, как много нужно  $^{235}\text{U}$ , выделенного из смеси природных изотопов урана, чтобы осуществить цепную ядерную реакцию деления, и ответили — всего один фунт, а не несколько тонн, как полагали до этого многие физики. Это подтолкнуло английское правительство создать для анализа этой проблемы специальный комитет «Maud», который летом 1941 г. пришел к заключению о возможности изготовления ядерной бомбы за два-три года. Сообщалось, что «будет возможно сделать эффективную урановую бомбу, содержащую 25 фунтов активного материала, которая будет эквивалентна по эффекту разрушения 1800 т тринитротолуола».

«В первых числах июня 1940 г., — как вспоминает сотрудница музея В. И. Вернадского И. Н. Ивановская [96], — В. И. Вернадский получил от сына Георгия, жившего тогда в Соединенных Штатах Америки, письмо, в котором была вырезка из газеты «Нью-Йорк Таймс» от 5 мая 1940 г. со статьей, в которой говорилось о возможности практического использования энергии ядра атома и о ведущихся в этом направлении исследованиях.

В ответном письме сыну от 5 июля 1940 г. Вернадский написал: «Это было первое известие, которое дошло до меня. . . Я немедленно двинул дело», и по его инициативе в АН СССР 25 июня 1940 г. была создана специальная группа, которая должна была наметить первоочередные меры для постановки проблемы на практические рельсы. В нее вошли В. И. Вернадский, А. Е. Ферсман и В. Г. Хлопин. 12 июля 1940 г. за подписями этих ученых было направлено письмо на имя зам. Председателя Совета Народных Комис-

саров СССР Н. А. Булганина, в котором отмечалось, «что уже сейчас назрело время, чтобы правительство, учитывая важность решения вопроса о техническом использовании внутриатомной энергии, предприняло ряд мер, которые обеспечили бы Советскому Союзу возможность не отстать в разрешении этого вопроса от зарубежных стран».

**9.2. «Флеров не находит покоя».** Здесь мы приводим некоторые факты из книги «И. В. Курчатов» И. В. Головина [78, с. 55.], который достаточно детально был знаком с урановой проблемой, являясь с 1950 г. первым заместителем начальника Лаборатории измерительных приборов АН СССР академика И. В. Курчатова.

«В июле 1941 г. Г. Н. Флеров попал в ленинградское ополчение, потом был направлен в Военно-воздушную академию в Йошкар-Олу. В конце декабря 1941 г. . . . он выхлопотал поездку в Казань для встречи с Курчатовым. Но Курчатов тогда еще не вернулся. . . . Г. Н. Флеров выступил с докладом перед А. Ф. Иоффе, П. Л. Капицей, В. И. Вернадским и другими физиками с обстоятельным изложением опытов, которые, по его мнению, необходимо срочно ставить в Казани: надо исследовать «динамитные» цепные ядерные реакции — реакции на быстрых нейтронах. . . . Об этом он написал Курчатову. Однако письмо попало Игорю Васильевичу только после выздоровления. . . . и ответ Флерову задерживался.

«Одержимый» Флеров не отступает; уехав на фронт, он пишет Иоффе: «Нельзя оставлять надежды на успех в осуществлении уранового оружия. . . .». Проезжая через Воронеж, Флеров имеет возможность посетить университетскую библиотеку. Просматривая американские журналы, он еще раз убеждается, что американцы не публикуют сведений по исследованию урана. Это укрепляет его решение: откладывать больше нельзя. В мае 1942 г. Флеров пишет Сталину в Государственный комитет обороны, что «надо, не теряя времени, делать урановую бомбу». Повторяет аргументы, приведенные в письме Курчатову, приводит наброски плана организации работ».

Те же факты излагает и сам Г. Н. Флеров в интервью «У истоков освоения ядерной энергии», данной газете «Московские новости» в апреле 1985 г. [97].

То же сообщает в своей статье С. В. Кафтанов в журнале «Химия и жизнь» [98]. Из рассказа С. В. Кафтanova следует, что письмо Г. Н. Флерова, наряду с фактами о проводящейся интенсивной секретной работе в Германии, Великобритании и США по созданию ядерной бомбы, добытыми внешней разведкой СССР, сыграло свою роль в принятии в тяжелейший период Великой Отечественной войны решения правительства о быстрейшем развертывании высокочатратных работ по разработке и созданию аналогичного ядерного оружия.

**9.3. Еще раз о письмах Г. Н. Флерова 1941–1942 гг.** О набатном письме Г. Н. Флерова И. В. Сталину упоминается во многих публикациях, связанных с грандиозным проектом разработки и создания ядерного оружия в СССР.

Первая публикация сокращенных версий писем Г. Н. Флерова И. В. Сталину и его секретарю состоялась 17 апреля 1988 г. в еженедельной газете «Московские новости» за подписью Михаила Черненко [99]. История этой публикации началась с обещания Г. Н. Флерова заместителю главного редактора журнала «Химия и жизнь» М. Черненко впервые опубликовать в журнале свое письмо И. В. Сталину, тогда хранящееся уже многие годы в сейфе для секретных материалов Лаборатории № 2 АН СССР в Институте атомной энергии им. И. В. Курчатова.

Г. Н. Флеров обратился за разрешением опубликовать свои письма военных лет в открытой печати к директору ИАЭ им. И. В. Курчатова А. П. Александрову, который поручил рассмотреть просьбу Г. Н. Флерова своему заместителю В. Г. Легасову, связанному родственными узами с одним из членов Политбюро ЦК КПСС, без ведома которого публикация писем Г. Н. Флерова была невозможна. И он получил отказ с мотивировкой, что если публиковать его письма, то только полностью, а полностью их опубликовать нельзя из-за неодобрительных отзывов в этих письмах о некоторых лицах.

Тогда Г. Н. Флеров решился на частичную публикацию своих писем, используя сложившуюся ситуацию — принципиальный корреспондент М. Черненко и вольнодумная в то время газета «Московские новости», которую редактировал глашатай перестройки Е. В. Яковлев и куда перешел М. Черненко.

А далее последовала беседа между корреспондентом газеты М. Черненко и Г. Н. Флеровым, который сохранил в личном архиве рукописные черновики своих писем, как пишет М. Черненко, «листы бумаги, корявый, по мнению других, кошмарный почерк» (от себя добавлю — почерк, характерный для левши, пишущего правой рукой). Я не повторяю здесь содержания опубликованных в газете «Московские новости» сокращенных вариантов писем Г. Н. Флерова «секретарю тов. Сталина» и «дорогому Иосифу Виссарионовичу», в которых «неодобрительные отзывы были опущены, согласно древнему римскому правилу» (примечание М. Черненко).

В качестве подготовки к этой газетной публикации по просьбе Г. Н. Флерова были исполнены более развернутые, чем опубликованные в газете «Московские новости», машинописные копии его личных черновиков писем военных лет, адресованных «уважаемому товарищу Кафтанову», «дорогому Игорю Васильевичу» (Курчатову), «секретарю тов. Сталина — уважаемому товарищу» и «дорогому Иосифу Виссарионовичу», и с них были сняты светокопии. Эти светокопии были распространены Георгием Николаевичем среди некоторого круга лиц, и, в частности, предоставлены мне в связи с его поручением написать воспоминания о становлении второй области его научной деятельности — физики тяжелых ионов, которая началась в 1953 г. в ЛИПАН сразу же после его вынужденного ухода из КБ-11 в Арзамасе-16, куда он был командирован из Лаборатории № 2, и с 1957 г. продолжалась в ОИЯИ в качестве директора Лаборатории ядерных реакций, ныне носящей его имя.

Пользуясь случаем, скажу, что причиной ухода Г. Н. Флерова из КБ-11, как рассказал он сам на цеховом партийном собрании в ЛИПАН при вступлении в 1953 г. в кандидаты в члены КПСС, были некие инциденты. Один из них состоял в том, что Г. Н. Флеров, доктор физ.-мат. наук, начальник сектора, оказал физическое противодействие милиционеру, когда тот попытался не пустить его, одетого в телогрейку и грубые ботинки, в так называемую генеральскую столовую в Арзамасе-16.

Замечу, что Г. Н. Флеров был хорошо атлетически подготовлен, поскольку и ранее, и в то время активно занимался любительским боксом, волейболом (член второй сборной команды Ленинграда), теннисом и другими видами спорта.

Поручение Г. Н. Флерова написать о становлении физики тяжелых ионов я, надеюсь, выполнил своей заметкой «Истоки физики тяжелых ионов, или из Москвы в Дубну», опубликованной в 1996 г. в юбилейном сборнике «ОИЯИ — 40 лет» [100]. Однако материалами из переданных мне светокопий флеровских писем воспользоваться в этих воспоминаниях не удалось. Я предполагал включить в текст моих воспоминаний всего несколько предложений из письма Г. Н. Флерова И. В. Сталину, наиболее полно выражающих дух письма: «Это и есть та стена молчания, которую, я надеюсь, Вы мне можете пробить, так что это письмо последнее, после которого я складываю оружие и жду, когда удастся решить задачу в Германии, Англии или США. Результаты будут настолько огромны, что будет не до того, чтобы определять, кто виноват в том, что у нас в Союзе забросили эту работу».

Те же светокопии получил Ю. Н. Смирнов, который в 1996 г. их опубликовал, по-своему расшифровал неясные для него места [101].

Черновики писем Г. Н. Флерова были официально рассекречены только в 1997 г., т. е. через 9 лет после их первой частичной публикации в еженедельнике «Московские новости» и через 7 лет после смерти Георгия Николаевича. Публикация этих и других писем Г. Н. Флерова 1941–1945 гг. появилась в виде материалов «История атомного проекта» Р. В. Кузнецовой и Н. В. Селезневой [90].

Сопоставлению писем Г. Н. Флерова, опубликованных Р. В. Кузнецовой и Н. В. Селезневой [90] и Ю. Н. Смирновым [101], посвящена статья [102] Г. А. Гончарова «О публикации искаженных версий писем Г. Н. Флерова 1941–1942 гг.», в которой автор подвергает критике статью Смирнова Ю. А. за неточное воспроизведение писем Георгия Николаевича. В своей статье [102, с. 53] Г. А. Гончаров спрашивает: «Когда были отправлены (и были ли отправлены вообще) письма Г. Н. Флерова секретарю И. В. Сталина и И. В. Сталину?», и тут же отвечает, что это «остается неясным. . . Сказанное выше не позволяет исключить, что работа Г. Н. Флерова над письмами И. В. Сталину и его секретарю, возможно, так и не была завершена, и они не были отправлены».

Вопрос о том, были ли отправлены Г. Н. Флеровым довольно-таки резкие и смелые письма руководителю Советского государства И. В. Сталину и его секретарю в суровое военное время, конечно, не является праздным не только для понимания личности самого Георгия Николаевича, но и для истории создания советского ядерного оружия. Поэтому мы снова обращаем внимание общественности на некоторые известные материалы, связанные с письмами Г. Н. Флерова.

В своем докладе на международном симпозиуме «Наука и общество. История Советского атомного проекта (40–50-е годы)» ветеран советской разведки В. Б. Барковский сообщил [103, с. 53]: «В мае 1942 года *на имя Сталина поступает в ГКО второе письмо Флерова с настойчивым призывом немедленно начать работы по созданию отечественного атомного оружия*».

На том же симпозиуме сотрудник ЦНИИАтоминформ А. К. Кружлов сообщил [104, с. 71] о докладной записке Л. Р. Квасникова, который с 1938 г. работал заместителем начальника отдела научно-технической разведки НКВД, а с 1939 г. — начальником отдела. В этой записке «О необходимости развертывания работ в государственном масштабе» Л. Р. Квасников сообщал следующее. «Я имел полный текст мотивированного письма (Пайерлс, Хальбан, Коварски) из Лондона, которое одновременно легло на стол Черчилля и мне. К сентябрю 1941 г. на основании материала доклада (70 страниц) этих ученых и телеграмм от резидента из Лондона Горского я составил реферат этого доклада. Именно с ним были ознакомлены наши ведущие физики: Иоффе и Капица, которые вынесли единодушное резюме о том, что в ближайшие годы атомная проблема не может быть решена нигде. Причем ближайшие годы оценивались десятком лет. Только в середине 1942 г. Берия, наконец, *ознакомил Сталина с запиской*, составленной мной в сентябре 1941 г., *к которой были присовокуплены* английский доклад, телеграммы из Лондона, *письмо Флерова, датированное мартом 1942 г.*, и резолюция С. В. Кафтанова по материалам, найденным украинскими партизанами у убитого немецкого офицера. . . ».

Из изложенного выше следует, что все-таки написал и послал Г. Н. Флеров письмо И. В. Сталину, и оно дошло до ближайшего окружения И. В. Сталина и было ему представлено. По словам А. П. Александрова [105, с. 104], «Флеровское письмо. . . явилось каким-то таким моментом, когда вокруг этого поднялось более или менее серьезное обсуждение. Потому что, по-видимому, к этому стеклись какие-то еще другие сведения, и вот это, вместе взятое, стало уже таким значимым, что его стали обсуждать».

На с. 61 статьи [90], в воспроизведенном авторами тексте письма Г. Н. Флерова секретарю Сталина, о деятельности академика А. Ф. Иоффе написано: «Но, однако, объективно подходя к вопросу, его поведение *ведет* к самому настоящему преступлению». Слова «ведет» нет в приведенной на с. 63 светокопии оригинала письма — видна только первая буква слова, закрытого неизвестной помехой, и эта буква «б», но не «в».

С другой стороны, в светокопии письма Г. Н. Флерова, хранящейся в ОИЯИ, в архиве службы защиты объекта в деле «Личные материалы Г. Н. Флерова 1941–1943 гг.», ясно читается: «Но, однако, объективно подходу к вопросу, его поведение *близко к самому настоящему преступлению*». Этот фрагмент светокопии ОИЯИ приведен на рис. 13.

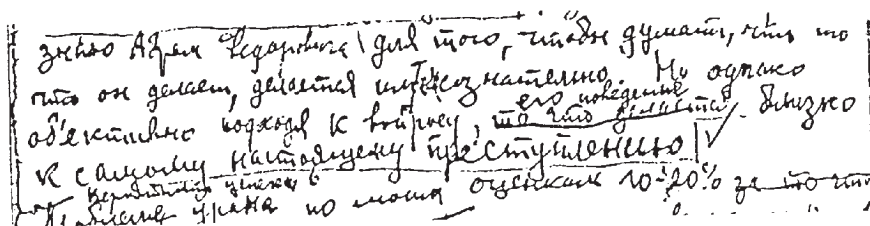


Рис. 13. Фрагмент светокопии письма Г. Н. Флерова секретарю Сталина (апрель 1942 г.)

Думаю, что выражение «поведение близко к...» существенно мягче и тактичнее, чем выражение «поведение ведет к...».

Из материалов «Атомного проекта СССР» [106, с. 252] следует также, что «вероятно, ... и В. Г. Хлопин считал А. Ф. Иоффе ответственным за приостановку после начала войны работ по ядру».

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Через пять лет после открытия физического явления — деления тяжелых ядер ядерная энергия, выделяющаяся в процессе деления, была обращена в тепловую энергию, пригодную для удовлетворения потребностей людей в тепле. К сожалению, построенные для этого первые реакторы с цепной критической реакцией деления на природном уране были предназначены не для производства тепла для обогрева, а для наработки другого нуклида  $^{239}\text{Pu}$ , аналогичного по делительным свойствам  $^{235}\text{U}$  и нужного для изготовления ядерной бомбы.

Затем последовало сооружение ядерных реакторов на тепловых нейтронах и ядерном топливе, содержащем или обогащенный уран, или уран с необходимой концентрацией наработанного  $^{239}\text{Pu}$ . Эти реакторы позволили использовать энергию деления тяжелых ядер для получения в широких масштабах тепла и электроэнергии.

Использование ядерных реакторов деления на быстрых нейтронах, привлекательной особенностью которых является воспроизводство ядерного топлива в количестве, не меньшем затраченного, пока не очень эффективно для



широкого использования природного урана и тория в ядерных реакторах для производства энергии.

После аварии на АЭС «Три-майл Айленд» в США в 1979 г. и крупнейшей аварии на Чернобыльской АЭС в 1986 г. многие страны стали сворачивать программы развития ядерной энергетики, в основном, под влиянием общественного мнения. Бельгия, например, запланировала закрытие своих АЭС в ближайшие десятилетия. Однако когда страсти в обществе поостыли, началось понимание того, что в настоящее время другого пути развития энергетики, кроме как основанного на энергии ядра, нет. Поэтому некоторые страны начали улучшать безопасность эксплуатации своих атомных электростанций и наращивать их мощности.

Наряду с этим активизировались исследования по освоению ядерной энергии другими способами. В частности, путем термоядерного слияния легких ядер и путем электроядерного генерирования нейтронов под действием ускоренных легких заряженных частиц и последующего использования нейтронов для возбуждения безопасного подкритического реактора деления на тории или природном уране. Однако эти методы, разработка и изучение которых продолжаются вот уже более 50 лет, пока еще очень далеки от практического использования.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Лаврентьев О. А.* Все началось с солдата // Сибирский физ. журн. 1995. №2. С. 51.
2. *Вернадский В. И.* Очерки и речи. Петроград: Научное химико-техн. изд-во, 1922.
3. Принцип относительности // Сб. работ по специальной теории относительности / Сост. А. А. Тяпкин. М., 1973.
4. *Лоренц Г. А.* Интерференционный опыт Майкельсона // Сб. [3]. С. 8.
5. *Лоренц Г. А.* Электромагнитные явления в системе, движущейся с любой скоростью, меньшей скорости света // Сб. [3]. С. 65.
6. *Манолов К., Тютюнник В.* Биография атома. М.: Мир, 1985.
7. *Пуанкаре А.* Настоящее и будущее математической физики // Сб. [3]. С. 27.
8. *Эйнштейн А.* К электродинамике движущегося тела // Сб. [3]. С. 95.
9. *Aston F. W.* Mass-spectra and Isotopes. London: Edward Arnold and Co., 1933;  
*Астон Ф. В.* Масс-спектры и изотопы: Пер. с англ. М.: ГИИЛ, 1948.
10. *Audi G. et al.* // Nucl. Phys. A. 1997. V. 624. P. 1.
11. *Резерфорд Э.* // УФН. 1921. Т. 11. С. 194.
12. *Chadwick J.* // Nature. 1932. V. 129. P. 312.
13. *Ivanenko D. D.* // Comp. Rend. Ac. Sci. 1932. V. 195. P. 435;  
*Ivanenko D. D.* // Nature. 1934. V. 138. P. 981.
14. *Fermi E.* // Ibid. V. 133. P. 838;  
*Amaldi E. et al.* // Proc. Roy. Soc. 1934. V. 146. P. 483.

15. *Noddack I.* // *Angewandte Chemie.* 1934. V. 47. P. 653.
16. *Curie I., Savitch P.* // *J. Phys. Rad.* 1938. V. 9. P. 355.
17. *Hahn O., Strassmann F.* // *Naturwissenschaften.* 1938. Bd. 26. S. 755.
18. *Hahn O., Strassmann F.* // *Naturwissenschaften.* 1939. Bd. 27. S. 11.
19. *Frisch O. R.* // *Nature.* 1939. V. 143. P. 276.
20. *McMillan E.* // *Phys. Rev.* 1939. V. 55. P. 510.
21. *Meitner L., Frisch O. R.* // *Nature.* 1939. V. 143. P. 239.
22. *McMillan E., Abelson P. H.* // *Phys. Rev.* 1940. V. 57. P. 1186.
23. *Nier A. O. et al.* // *Phys. Rev.* 1940. V. 57. P. 546L.
24. *Von Halban H., Jr., Joliot F., Kowarski L.* // *Nature.* 1939. V. 143. P. 680.
25. *Русинов Л. И., Флеров Г. Н.* // *Изв. АН СССР. Сер. физ.* 1940. Т. 4. С. 310.
26. Повесть об Игоре Васильевиче Курчатове, составленная из воспоминаний, рассказанных его учениками и сотрудниками — академиком Георгием Николаевичем Флеровым и членом-корреспондентом АН СССР Исаем Исидоровичем Гуревичем писателю Борису Володину // *Химия и жизнь.* 1978. № 11. С. 20.
27. *Zinn W. H., Scillard L.* // *Phys. Rev.* 1939. V. 55. P. 799.
28. *Zinn W. H., Scillard L.* // *Ibid.* V. 56. P. 619.
29. *Ерозолимский Б. Г.* Нейтроны деления // *Физика деления атомных ядер: Сб. М., 1957.*
30. *Roberts R. B., Meyer R. C., Hafstad L. R.* // *Phys. Rev.* 1939. V. 55. P. 417.
31. *Bohr N., Wheeler J. A.* // *Ibid.* V. 56. P. 426.
32. *Myers W. D., Swiatecki W. J.* // *Ann. Phys.* 1969. V. 55. P. 395.
33. *Френкель Я. И.* // *Изв. АН СССР. Сер. физ.* 1938. Т. 1–2. С. 233;  
*Френкель Я. И.* // *ЖЭТФ.* 1939. Т. 9. С. 841.
34. *Смирнов В. И.* Курс высшей математики. Т. 3. Ч. 2. Л.; М., 1949.
35. *Иваненко Д., Соколов А.* Классическая теория поля (новые проблемы). 2-е изд. Л.; М.: ГИТТЛ, 1951.
36. *Ахиезер А., Померанчук И.* Некоторые вопросы теории ядра. Л.; М.: ГИТТЛ, 1950.
37. *Краут А.* Достижения в физике деления ядер // *Физика деления ядер: Сб. / Под ред. В. С. Ставинского. М., 1963. С. 7.*
38. *Мигдал А. Б.* // *ЖЭТФ.* 1945. Т. 15. С. 81.
39. *Тарантин Н. И., Ким Су Мен* // *Раб. совещ. по использованию микротронов в ядерной физике, Пловдив, 22–24 сент. 1992 г. Дубна, 1993. С. 75;*  
*Tarantin N. I., Kim Su Men* // *XIV Intern. Workshop on Nuclear Fission Physics. Obninsk, 2000. P. 211.*
40. *Bethe H. A.* // *Rev. Mod. Phys.* 1937. V. 9. P. 69.
41. *Libby W.* // *Phys. Rev.* 1939. V. 56. P. 1269.
42. *Флеров Г. Н.* Работы в Советском Союзе по делению ядер до 1942 г. Спонтанное деление в прошлом, настоящем и будущем // *Междунар. конф. «Деление ядер — 50 лет», Ленинград, 16–20 окт. 1989 г. Т. 1. С. 43.*
43. *Флеров Г. Н.* Всеми мы можем поучиться у Курчатова // *Воспоминания об Игоре Васильевиче Курчатове: Сб. / Отв. ред. А. П. Александров. М., 1988. С. 57.*

44. Флеров Г. Н., Никитинская Т. И. // Изв. АН СССР. Сер. физ. 1941. Т. 5. С. 603.
45. Flerov G. N., Petrzhak K. A. // Phys. Rev. 1940. V. 58. P. 89.
46. Петржак К. А., Флеров Г. Н. // Докл. АН СССР. 1940. Т. 28. С. 500;  
Флеров Г. Н., Петржак К. А. // ЖЭТФ. 1940. Т. 109. С. 1013.
47. Флеров Г. Н., Панасюк И. С. // Докл. АН СССР. 1941. Т. 30. С. 699.
48. Rose H. // Z. Phys. 1943. Bd. 121. S. 292.
49. Атомный проект СССР. Документы и материалы / Под общей ред. Л. Д. Рябева. М.: Наука; Физматлит, 1998. Т. 1: 1938–1945. Ч. 1.
50. Hill D. L., Wheeler J. A. // Phys. Rev. 1953. V. 89. P. 1102.
51. Frankel S., Metropolis N. // Phys. Rev. 1947. V. 72. P. 914.
52. Businaro U. L., Gallone S. // Nuovo Cim. 1955. V. 1. P. 629.
53. Носов В. Г. К теории деления тяжелых ядер вблизи порога. Физика деления атомных ядер: Сб. М., 1957. С. 52.
54. Hill D. L. // Phys. Rev. 1952. V. 87. P. 1034.
55. Plutonium Project // Rev. Mod. Phys. 1946. V. 18. P. 539.
56. Spence R. W. Report BNL-C-9. 1949.
57. Glendenin L. E., Coryell Ch. D., Edwards R. R. Radiochemical Studies // The Fission Products. Nat. Nucl. Energy Ser. N. Y., 1951. V. 9. P. 425.
58. Rappas A. // Electrochem. 1954. V. 58. P. 620.
59. Поликанов С. М. и др. // ЖЭТФ. 1962. Т. 42. С. 1464.
60. Петржак К. А., Флеров Г. Н. // АЭ. 1978. Т. 44. С. 22.
61. Струтинский В. М. // ЯФ. 1966. Т. 3. С. 514;  
Strutinsky V. // Nucl. Phys. A. 1967. V. 95. P. 420; 1968. V. 122. P. 1.
62. Oganessian Yu. Ts. et al. // Nucl. Phys. A. 2004. V. 273. P. 75.
63. Ставинский В. С., Работнов Н. С., Серегин А. А. // ЯФ. 1968. Т. 7. С. 1051.
64. Pashkevich V. V. // Nucl. Phys. A. 1971. V. 169. P. 275.
65. Кузнецов В. И., Скобелев Н. К., Флеров Г. Н. // ЯФ. 1966. Т. 4. С. 99, 279; Т. 5. С. 271.
66. Seaborg G. T. et al. // Phys. Rev. 1946. V. 69. P. 366;  
Seaborg G. T. et al. // Ibid. P. 367.
67. Kennedy J. et al. // Phys. Rev. 1946. V. 70. P. 555.
68. Станцо В. Ненстовый Г. Н. // Химия и жизнь. 1991. № 6. С. 34.
69. Зельдович Я. Б., Харитон Ю. Б. // ЖЭТФ. 1939. Т. 9. С. 1425.
70. Зельдович Я. Б., Харитон Ю. Б. // ЖЭТФ. 1940. Т. 10. С. 29.
71. Флеров Г. Н. Работы Академии наук СССР по реакторам с ураном-235, плутонием-239 и водородным замедлителем // Сес. Академии наук СССР по мирному использованию атомной энергии, 1–5 июля 1955 г. Заседание отделения физ.-мат. наук. М., 1955. С. 170.
72. Головин И. Н. От Лаборатории № 2 до Курчатовского института // Курчатовский институт. История атомного проекта: Сб. М., 1995. Вып. 1. С. 3.
73. Ферми Э. // УФН. 1947. Т. 32. С. 54.
74. Немировский П. Э. На заре теории реакторов: идеи и люди // Курчатовский институт. История атомного проекта: Сб. М., 1995. Вып. 1. С. 80.

75. *Князькая Н. В.* И. В. Курчатов об основных направлениях работ первого этапа решения атомной проблемы в СССР, 1943–1946 гг. // Наука и общество: история советского атомного проекта (40–50 годы): Тр. междунар. симпозиума «ИСАП-96», Дубна, 14–18 мая 1996 г. М., 1999. Т. 2. С. 99.
76. *Фурсов В. С.* Работы Академии наук СССР по уран-графитовым реакторам // Сес. Академии наук СССР по мирному использованию атомной энергии, 1–5 июля 1955 г. Пленарное заседание. М., 1955. С. 15.
77. *Жежерун И. Ф.* Первый в Советском Союзе и на континенте атомный реактор Ф-1 // Наука и общество: история советского атомного проекта (40–50-е годы): Тр. междунар. симп. «ИСАП-96», Дубна, 14–18 мая 1996 г. М., 1999. Т. 2. С. 68.
78. *Головин И. Н.* И. В. Курчатов. 3-е изд., перераб. и доп. М., 1970. С. 134.
79. *Меркин В. И.* Создание промышленного реактора // Наука и общество: история советского атомного проекта (40–50 годы): Тр. междунар. симп. «ИСАП-96», Дубна, 14–18 мая 1996 г. М., 1997. Т. 1. С. 116.
80. *Стужев Ю. А., Шарапов В. Н.* 35 лет эксплуатации первой в мире АЭС // Междунар. конф. «Деление ядер — 50 лет», Ленинград, 16–20 окт. 1989 г. Т. 1. С. 133.
81. *Гладков Г. А., Никольский Ю. Б.* // АЭ. 2001. Т. 90. С. 88.
82. *Бургов Н. А.* Резонансное поглощение нейтронов в гетерогенных системах // Сес. Академии наук СССР по мирному использованию атомной энергии, 1–5 июля 1955 г. Заседание отделения физ.-мат. наук. М., 1955. С. 67.
83. *Владимирский В. В., Чувило И. А., Шведов О. В.* Институт теоретической и экспериментальной физики // Ядерная индустрия России: Сб. М., 2000. С. 145.
84. Бюллетень МАГАТЭ. 2002. Т. 44, № 2. С. 59.
85. *Солонин М.* // Вестн. концерна «Росэнергоатом». 2002. № 1. С. 4.
86. Review. Oak Ridge National Laboratory. 2002. V. 35, No. 2. P. 2.
87. *Lake J. A., Bennet R. G., Kotek J. F.* // Sci. American. V. 286. P. 72.
88. *Флеров Г. Н., Гуревич И. И.* Саморазмножающиеся котлы. Ядерные котлы с замедлением нейтронов в простой воде. Саморазмножающиеся гетерогенные котлы. Проект мероприятий по осуществлению саморазмножающихся котлов: Тез. докл. // Курчатовский институт. История атомного проекта: Сб. М., 1998. Вып. 13.
89. *Субботин В. И.* Сообщение ОИЯИ Р1-2000-323. Дубна, 2000.
90. *Кузнецова Р. В., Селезнева Н. В.* «Тревожный колокол» Георгия Флерова. Письма Г. Н. Флерова (1941–1945 гг.) // Курчатовский институт. История атомного проекта: Сб. М., 1998. Вып. 13. С. 5.
91. *Флеров Г. Н.* К вопросу об использовании внутриатомной энергии // Курчатовский институт. История атомного проекта: Сб. М., 1998. Вып. 14. С. 165.
92. *Замятин Ю. С.* // Вопросы истории, естествознания и техники. 1996. № 2. С. 140.
93. *Дубасов Ю. В. и др.* Подземные взрывы ядерных устройств в промышленных целях на территории СССР в 1965–1988 гг.: хронология и радиационные последствия // Бюл. Центра общественной информ. по атомной энергии. 1994. № 1. С. 24.
94. *Плоткина А. Г., Воинов Е. М.* Академик Исаак Константинович Кикоин — научный руководитель проблемы разделения изотопов урана в СССР (1908–1984) // Наука и общество: история советского атомного проекта (40–50 годы): Тр. междунар. симп. «ИСАП-96», Дубна, 14–18 мая 1996 г. М., 1999. Т. 2. С. 195.
95. *Шуколюков Ю. А.* Продукты деления тяжелых элементов на Земле. М.: Энергоиздат, 1982.

- 
96. *Ивановская И. Н.* Вернадский у истоков атомной энергетики // Наука и общество: история советского атомного проекта (40–50 годы): Тр. междунар. симп. «ИСАП-96», Дубна, 14–18 мая 1996 г. М., 1999. Т. 2. С. 112.
  97. *Флеров Г.* У истоков освоения ядерной энергии // Московские новости. 21 апреля 1985 г. № 16. С. 10.
  98. *Кафтанов С. В.* По тревоге // Химия и жизнь. 1985. Вып. 3. С. 6.
  99. *Черненко М.* 100000 тонн динамита или прошу исправить орфографию. К истории первых шагов советского атомного проекта // Московские новости. 17 апреля 1988 г. № 16. С. 16.
  100. *Тарантин Н. И.* Истоки физики тяжелых ионов, или из Москвы в Дубну // ОИЯИ — 40 лет. Заметки, воспоминания, размышления: Сб. Дубна, 1996. С. 333.
  101. *Смирнов Ю. Н.* // Вопросы истории, естествознания и техники. 1996. № 2. С. 100.  
*Смирнов Ю. Г.* Г. Н. Флеров и становление советского атомного проекта // Наука и общество: история советского атомного проекта (40–50 годы): Тр. междунар. симп. «ИСАП-96», Дубна, 14–18 мая 1996 г. М., 1999. Т. 2. С. 139.
  102. *Гончаров Г. А.* // Вопросы истории, естествознания и техники. 2000. № 3. С. 35.
  103. *Барковский В. Б.* Участие научно-технической разведки в создании отечественного атомного оружия // Наука и общество: история советского атомного проекта (40–50 годы): Тр. междунар. симп. «ИСАП-96», Дубна, 14–18 мая 1996 г. М., 1997. Т. 1. С. 49.
  104. *Круглов А. К.* Кто участвовал в реализации советского атомного проекта // Наука и общество: история советского атомного проекта (40–50 годы): Тр. междунар. симп. «ИСАП-96», Дубна, 14–18 мая 1996 г. М., 1997. Т. 1. С. 62.
  105. *Александров П. А.* Академик Анатолий Петрович Александров. Прямая речь. 2-е изд., исправ. и доп. М., Наука. 2002.
  106. Атомный проект СССР. Документы и материалы / Под общей ред. Л. Д. Рябева. М.: Наука; Физматлит, 1998. Т. 1: 1945–1959. Ч. 1.