

Экспериментальное осуществление расходящейся цепной реакции.

Э. Ферми

(Получено 1952)

— — ◊ ◊ ◊ — —

Русский перевод взят из сборника: А. Ферми “Научные труды”, т. 2, стр. 150, под редакцией Б. Понтекорво

— — ◊ ◊ ◊ — —

В этой статье с небольшими редакционными изменениями воспроизводится отчет, написанный для Металлургической лаборатории Чикагского университета почти десять лет тому назад после экспериментального осуществления расходящейся цепной реакции. Этот отчет в настоящее время рассекречен и может быть опубликован.

Первый раздел отчета содержит общее описание первого котла и его работы. Подробности конструирования, изготовления и испытаний материалов и оборудования приводятся в приложениях I и II, написанных членами групп, которые выполняли эти работы.

Котел имел приблизительно форму сплюснутого эллипсоида из графита. Экваториальный радиус составлял 388 см, а полярный – 309 см. По всему объему графита был распределен уран в виде блоков (частично из металлического урана, а частично – из окиси урана), образуя кубическую решетку со стороной ячейки около 21 см. Описывается экспериментальная процедура, разработанная для достижения критических размеров и для управления работой котла. Фактические критические размеры сравниваются с ожидавшимися из результатов испытаний различных элементов структуры.

В этом отчете дано описание конструкции и работы котла, использующего цепную реакцию. Котел был построен в Лаборатории Вест-

Стэндс¹ в октябре–ноябре 1942 г. и был впервые запущен 2 декабря 1942 г.

Из описания котла станет ясно, что для экспериментов такого типа требуется сотрудничество большого числа физиков.

Группы Зина и Андерсона отвечали за подготовку материалов и фактическое сооружение котла; группа Вильсона готовила измерительные устройства и оборудование для автоматического управления. Подробности этих работ освещаются членами соответствующих групп в приложениях I и II.

Большую роль в успешном осуществлении эксперимента сыграли также службы Металлургической лаборатории, в частности, группы, занимавшиеся разработкой методов получения и испытания материалов. Исключительно высокие требования к чистоте графита и урана, которые к тому же были нужны в очень больших количествах, превратили поставки необходимых материалов, вероятно, в самую большую трудность для всего проекта.

Общее описание котла

По существу, котел представляет решетку из блоков урана (часть которых была из металлического урана, а часть – из окиси урана), размещенных в графите. За исключением небольших участков вблизи поверхности котла, решетка состояла из кубических ячеек со стороной 8.25 дюйма.

Поскольку в нашем распоряжении находилось относительно небольшое количество металла (около шести тонн), а различные сорта графита имели разную степень чистоты, первоначально было решено строить котел приблизительно сферической формы, располагая наилучшие материалы как можно ближе к центру. В действительности же оказалось возможным достичь условий критичности до завершения строительства сферы, и оно было прервано после укладки одного слоя сверх критических размеров. По той же причине размеры верхних слоев котла были сделаны заметно меньше, чем было бы необходимо для сохранения первоначально намечавшейся сферической формы. Существующую форму котла грубо можно описать как сплюснутый эллипсоид вращения с полярным радиусом 309 см и экваториальным радиусом 388 см (см. рис. 1). Графит поддерживался деревянной рамой, а нижние его слои покоились на полу.

¹Дословно: Западные трибуны.– Прим. ред.

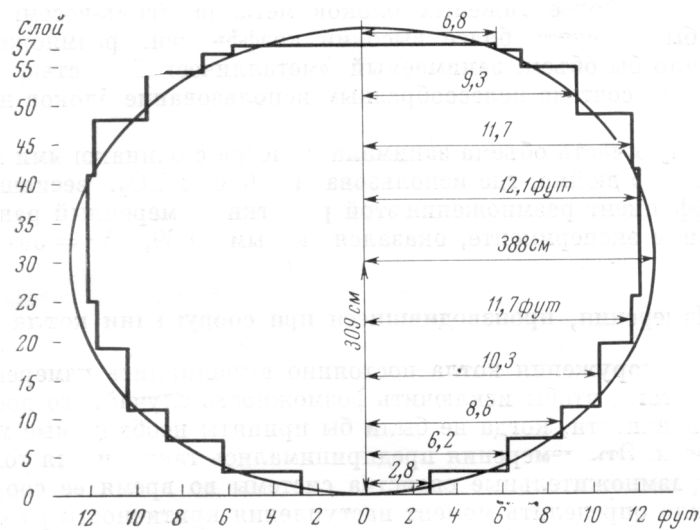


Рис. 1: Вертикальный разрез котла

Указан эквивалентный эллипсоид; размеры слева даны в футах

В первоначальном плане предусматривалось, что для достижения условий критичности может оказаться необходимой откачка воздуха из котла. По этой причине котел сооружался внутри прорезиненной оболочки, которая при необходимости могла быть загерметизована и откачана.

Поскольку в нашем распоряжении находилось всего лишь около 6 тонн металла, было решено, что конструкция части решетки, где располагался металл, должна обеспечить наилучшее использование металла, а не наибольшее значение коэффициента размножения. Используемые блоки металла, весившие около 6 фунтов, состояли из металла различного происхождения (Westinghouse, Metal hydrides, Ames). Экспоненциальный эксперимент, выполненный на металлической решетке, показал, что коэффициент размножения для нее составляет² 1.067, а $\nabla^2 = 101.7 \cdot 10^{-6} \text{ см}^{-2}$. Использование более тяжелых блоков металла (семь-восемь фунтов) позволило бы получить более высокий коэффициент размножения. Но это уменьшило бы объем, занимаемый "металлической" частью ре-

²Плотность нейтронов приблизительно меняется согласно уравнению $\nabla^2 n = an$, где a – постоянная, зависящая от физических и геометрических характеристик решетки. Значения a называются лаллаксияном и обозначаются через ∇^2 . Чем больше ∇^2 , тем лучше решетка.

шетки, и поэтому было сочтено целесообразным использование блоков несколько меньшего веса.

Наибольшую часть объема занимала решетка с одинаковыми ячейками со стороной 8.25 дюйма, где использовались блоки O_2 , весившие около 2140 г. Коэффициент размножения этой решетки, измеренный ранее в экспоненциальном эксперименте, оказался равным 1.039 а $\nabla^2 = 59 \cdot 10^{-6} \text{ см}^{-2}$.

Измерения, производившиеся при сооружении котла

Во время сооружения котла постоянно выполнялись измерения, служившие для того, чтобы исключить возможность случайного достижения условий критичности, когда не были бы приняты необходимые меры предосторожности. Эти измерения предпринимались также и для того, чтобы проверять размножительные свойства системы во время ее сооружения, что позволило определить момент наступления критичности ранее фактического его осуществления.

Указанные измерения выполнялись с помощью детекторов двух типов. В щели, примерно на 43 дюйма выше основания, стоял счетчик с ВГЗ. Естественные нейтроны, спонтанно испускаемые ураном, являются вполне подходящим источником для этой цели; никаких других источников нейтронов не добавлялось.

Типичные результаты таких измерений собраны в табл. I. В первой графе указывается высота структуры, выраженная в числе слоев

Таблица I

Слой		$R_{\text{эфф}}$ см	$R_{\text{эфф}}^2/A$	Слой	A	$R_{\text{эфф}}$ см	$R_{\text{эфф}}^2/A$
15	42	128	390	41	850	288	98
19	78	158	320	45	1360	308	70
23	119	187	294	47	1940	317	52
25	148	200	270	51	4400	332	25
29	221	225	229	54	12400	344	9.5
33	345	248	178	57	Расход	356	—
36	470	265	149	—	—	—	—

(толщина каждого слоя составляла около $4^{1/8}$ дюйма). Во второй графе приводятся значения активности A (имп/мин), наведенной в стандартной индиевой фольге спонтанными нейтронами, когда фольга располагалась в центре структуры, где интенсивность нейтронов максимальна. В действительности фольги располагались неподалеку от этого места, так что приходилось вводить небольшую поправку, учитывающую тот факт, что фольга не находилась точно в оптимальной позиции.

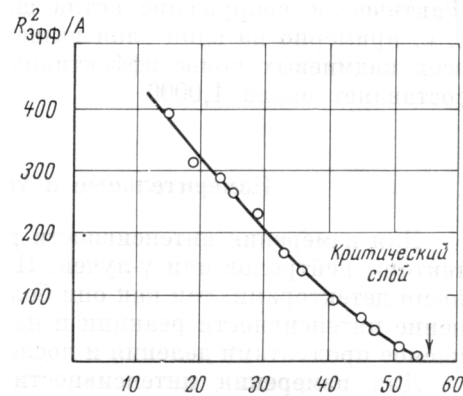


Рис. 2: График приближения к критическим размерам при сооружении котла

В сферической структуре, которая при бесконечных размерах имела бы

коэффициент размножения 1, активация расположенного в центре детектора под действием спонтанных нейтронов пропорциональна квадрату радиуса. Подобным свойством обладает и эллипсоид: активация в центре пропорциональна квадрату эффективного радиуса $R_{\text{эфф}}$, который определяется из уравнения

$$\frac{3}{R_{\text{эфф}}^2} = \frac{1}{a^2} + \frac{1}{b^2} + \frac{1}{c^2}, \quad (1)$$

где a , b и c – полуоси эллипсоида. Ясно, что для сферических сегментов (такую форму имела наша структура на различных стадиях постройки) основная математическая трудность должна была состоять в точном определении $R_{\text{эфф}}$. Однако для любой высоты сферического сегмента оказалось возможным без больших затруднений и не слишком произвольно определять эквивалентный сплюснутый эллипсоид графически. Затем по формуле (1) вычислялся эффективный радиус. Таким образом вычислялись значения, приведенные в третьей графе табл. 1.

Если бы коэффициент размножения нашей решетки был равен 1, то значения четвертой графы табл. 1 были бы постоянны. Вместо этого, как видно из графы 4, эти значения все время убывают и достигают нуля в районе 56-го слоя. Это и есть точка достижения условий критичности, где активация, обусловленная спонтанными нейтронами, должна стать бесконечно большой. График величины $R_{\text{эфф}}^2/\Lambda$ приведен на рис. 2. Номер критического слоя указывается пересечением кривой с осью абсцисс.

При сооружении котла, задолго до достижения этого критического слоя, в качестве меры предосторожности в соответствующие щели были введены кадмиевые полосы. Они вынимались один раз в день, при соблюдении мер безопасности, для определения степени близости к условиям критичности. Фактическое сооружение котла шло описанным образом до 57-го слоя, т.е. примерно на один слой выше критических размеров. При удалении всех кадмиевых полос эффективный коэффициент размножения системы составляет около 1.0006.

Измерительные и управляющие устройства

Для измерения интенсивности реакции можно использовать любые детекторы нейтронов или γ -лучей. Предпочтительнее пользоваться нейтронными детекторами, так как они более непосредственно реагируют

на изменение интенсивности реакции и на них не сказывается излучение, испускаемое продуктами деления и после остановки реакции.

Для измерения интенсивности реакции фактически использовалось несколько таких нейтронных детекторов: два пропорциональных счетчика с BF_3 размещались на внешней поверхности котла, а несколько ионизационных камер, наполненных BF_3 , помещались вблизи одной из стен котла. Эти камеры соединялись с усилителями, и усиленный ток использовался для приведения в действие записывающих приборов, автоматического управления и аварийных устройств.

Управление реакцией осуществлялось с помощью введения в котел полос из веществ, поглощающих нейтроны (использовался кадмий и, в одном случае, борсодержащая сталь).

Когда на котле не производятся исследования, несколько кадмиевых полос вставляются в щели с тем, чтобы сделать эффективный коэффициент размножения существенно меньше 1. Как было найдено на практике, для обеспечения подкритического состояния котла достаточно только одной из кадмиевых полос. Помимо нескольких кадмиевых полос, которые могут быть использованы для ручного управления, котел снабжен также двумя аварийными стержнями и одним стержнем автоматического управления. Аварийные стержни при нормальной работе котла находятся в выведенном положении. Они удерживаются в этом положении захватом, управляемым электромагнитом; когда захват отпускается, стержни втягиваются внутрь котла под действием присоединенной к ним системы грузов. Электромагниты питаются от усиливающей системы, так что аварийные стержни освобождаются автоматически, если интенсивность испускаемых котлом нейтронов превзойдет установленный уровень.

Стержень автоматического управления может вдвигаться в котел и выдвигаться из него с помощью двух электромоторов. Они приводятся в действие либо вручную, либо усиливающей системой, так что если интенсивность реакции превосходит заданный уровень, то стержень вдвигается в котел, а если интенсивность падает ниже этого уровня – выдвигается из котла. Подробное описание измерительных и управляющих устройств дано в приложении II.

Запуск котла

Для запуска котла из него выводятся все кадмиевые полосы за исключением одной. Затем последний стержень медленно выдвигается из котла.

По мере приближения к критическим условиям начинает быстро увеличиваться интенсивность нейтронов, испускаемых котлом. Следует заметить, что пока эта последняя кадмиевая полоса находится внутри котла и обеспечивает значение эффективного коэффициента размножения несколько ниже 1, для достижения равновесного значения интенсивности требуется длительное время. Аналогично и когда кадмиевая полоса выдвинута из котла, так что коэффициент размножения больше 1, возрастание интенсивности идет довольно медленно. Фактически, для нашего котла, при полном выведении всех кадмиевых полос интенсивность увеличивалась примерно вдвое за каждую минуту. Эти времена релаксации становятся чрезвычайно большими, если кадмиевая полоса находится вблизи критического положения. Например, для одной из управляющих полос было найдено, что время релаксации составляет $230/x$ минут, где x – расстояние до критического положения стержня в сантиметрах. Это означает, что если стержень находится лишь в 1 см от критического положения, то время релаксации составляет около 4 час. Соответствующая константа для стержня автоматического управления равна 180 мин. Эти большие времена релаксации (обусловленные тем, что при делении очень незначительная доля нейтронов испускается с запаздыванием) позволяют довольно легко добиваться работы котла на постоянном уровне интенсивности, для вывода котла на заданный уровень интенсивности можно поступать следующим образом.

Прежде всего из котла полностью выводится последняя полоса кадмия. Интенсивность, контролируемая различными измерительными устройствами, начинает медленно возрастать. Так как время релаксации в этих условиях составляет около двух минут, то желаемый уровень интенсивности обычно достигается за несколько минут. Как только счетчики обнаружат, что этот уровень достигнут, стержень вводится в котел до критического положения. Измерительные приборы немедленно указывают на выравнивание интенсивности около установленного уровня. Чтобы поддерживать этот уровень неизменным, достаточно двигать стержень на 1–2 см в ту или другую сторону всякий раз, как потребуются компенсировать небольшие изменения коэффициента размножения, обусловленные главным образом изменениями атмосферного деления.

На рис. 3 изображена запись автоматического регистратора интенсивности, сделанная во время первого запуска котла. На записи ясно видно экспоненциальное возрастание интенсивности. Было допущено возрастание интенсивности до уровня, соответствующего энерговыделению около 0.5 вт. Здесь сработало автоматическое аварийное устройство, аварийные стержни были введены внутрь котла и реакция была пре-

рвана, о чем свидетельствует резкое падение интенсивности на записи.

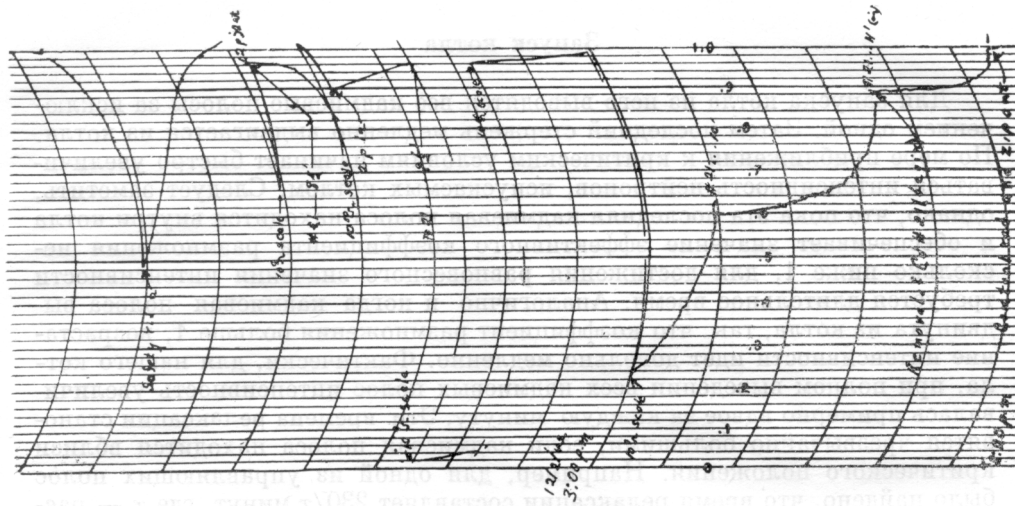


Рис. 3: Первый запуск котла. Автоматическая запись интенсивности реакции

Большой уровень интенсивности был достигнут в запуске 12 декабря, когда энергия, вырабатываемая котлом, составляла около 200 вт. Испытание не проводилось при более высокой интенсивности из-за ограничений, накладываемых требованием, чтобы уровень радиации вне здания был существенно ниже допустимой физиологической дозы.

Таблица II
Измерение доз радиации в окрестности котла

	Миллирентген в минуту	Активация стандартной индиевой фольги при насыщении имп/мин
Вблизи котла	50	$8 \cdot 10^6$
В комнате, где стоит котел, но вдали от него	6	$1 \cdot 10^6$
Коридоры по сторонам помещения котла	2	$2 \cdot 10^5$
Башенная комната	0.0005	Пренебрежимо мало
Тротуар Эллис-стрит, ближайший к котлу	0.05	6 000
Тротуар Эллис-стрит, отдаленный от котла	0.01	2 700
Контроль	0.001	—

Во время работы при большой интенсивности, продолжавшейся около 45 мин, были проделаны измерения интенсивности в различных комнатах внутри здания и на улице с помощью стандартных рентгенметров, а также счетчиков с ВФ₃ и индиевых фольг (для обнаружения нейтронной интенсивности). Типичные значения, найденные при этих измерениях, приведены в табл. II.

Сравнение ожидавшихся и фактических критических размеров

Несмотря на то что геометрическая форма котла далека от правильной, а его внутренняя структура разнородна, можно сделать некоторые выводы относительно фактических значений коэффициентов размножения различных типов решеток, использованных в котле, и сравнить эти значения с ожидавшимися из результатов экспоненциальных экспериментов.

Как уже указывалось (см. рис. 1), форма котла близка к сплюсненному эллипсоиду вращения с полярной полуосью 309 см и экваториальной полуосью 388 см. Эффективный радиус системы полученный по форму-

ле (1), составляет

$$R = 355 \text{ см.}$$

Такое значение радиуса соответствует величине $\nabla^2 = 78.3 \cdot 10^{-6} \text{ см}^{-2}$ и среднему коэффициенту размножения около 1.054.

Так как в разных местах системы использовались разные типы решеток, то приведенные значения являются средними для всех использованных решеток. Их можно сравнить с индивидуальными значениями только в том случае, если известны статистические веса, присущие различным типам решеток.

Как легко показать, статистический вес данной компоненты решетки в первом приближении пропорционален произведению объема, занимаемого решеткой данного типа, на средний квадрат плотности нейтронов в этом объеме. мы попытались вычислить этим методом статистические веса различных решеток, представленных в нашей структуре. Результаты вычислений приведены в табл. III.

Таблица III
Статистический вес решеток различного типа в котле

Тип решетки	Статистический вес, %	$\nabla^2 \cdot 10^6$ по экспоненциальным экспериментам
Металл	39.2	+102
AGOT Brown AGOT	53.5	+59
Speer	6.6	+45
US "живой"	0.5	-10
"Мертвый"	0.2	-520
	Взвешенное среднее	73.4

В первой графе указывается тип решетки. Ради простоты под наименованием "Speer" объединено несколько типов решетки, имевших, как предполагалось, довольно близкие коэффициенты размножения. Во второй графе для каждого типа решетки приводится статистический вес, выраженный в процентах. В третьей графе указывается значение

∇^2 , найденные в экспоненциальных экспериментах. Среднее взвешенное значение ∇^2 составляет 73.4, тогда как оценка из критических размеров дает 78.3.

Это служит указанием на то, что значение ∇^2 и коэффициентов размножения, найденные из экспоненциальных экспериментов, несколько ниже истинных. Правильные значения, видимо, на 0.003 или 0.004 выше опубликованных.

Энергия, вырабатываемая котлом

Число нейтронов, испускаемых котлом, число делений и выделенная энергия могут быть оценены по активации стандартных индиевых фольг, помещаемых внутрь котла. Калибровка индиевых фольг показала, что между резонансной активацией при насыщении $A_{рез}$ (имп/мин) фольги, защищенной кадмием, и плотностью замедления нейтронов в графите существует следующее соотношение:

$$q = 0.00156 A_{рез}. \quad (2)$$

Кадмиевое отношение в подавляющей части объема нашей структуры составляет около 6.6. Это означает, что если измеряется активация при насыщении A (имп/мин) индиевой фольги, не защищенной кадмием, то активность при защите кадмием составила бы

$$A_{рез} = A/6.6$$

и, следовательно,

$$q = 0.00156 A/6.6 = 0.000236 A.$$

Полное число нейтронов, которые замедляются внутри котла от энергии выше индиевого резонанса до энергии ниже этого значения, будет поэтому равно

$$0.000236 \bar{A}V,$$

где \bar{A} – средняя величина активации, а V – объем котла. Он был принят равным

$$V = 1.95 \cdot 10^8 \text{ см}^3.$$

Далее, как можно оценить, величина \bar{A} составляет около 0.3 от активности A_0 в центре котла. Отсюда получаем, что полное число нейтронов,

замедляемых в котле от энергии выше индиевого резонанса до энергии ниже этого значения, равно

$$1.4 \cdot 10^4 A_0.$$

Учитывая, что некоторая доля образовавшихся в котле быстрых нейтронов резонансно поглощается до того, как они достигнут энергии индиевого резонанса, и что небольшая часть нейтронов ускользает из котла, полное число нейтронов, образовавшихся в котле, должно быть примерно на 13% больше указанного значения. Итак, полное число образовавшихся нейтронов равно

$$1.6 \cdot 10^4 A_0 \quad (3)$$

Если принять, что при акте деления испускается 2.2 нейтронов, то число делений в секунду будет равно

$$F = 7200 A_0.$$

Полагая, что при акте деления выделяется 200 Мэв энергии, т.е. $3.2 \cdot 10^{-4}$ эрг, получим, что энергия вырабатываемая котлом, составляет

$$2.3 A_0 \text{ эрг/сек} = 2.3 \cdot 10^{-7} A_0 \text{ вт}$$

Эта формула использовалась для получения уже приводившихся оценок мощности котла.

Приложение I

Сооружение ядерного котла

Г. Андерсон, А. Грэйес, П. Кунц, Л. Серен,
А. Ваттенберг, Дж. Вейль и У. Зинн

В предыдущих разделах данного отчета обсуждались общие структурные характеристики котла, использующего цепную реакцию. В этом разделе содержится подробный проект уран-графитовой системы, сопровождаемый кратким описанием методов изготовления и проверки специальных материалов. Эта работа, занявшая около трех месяцев, потребовала очень тщательных физических измерений свойств довольно больших количеств материалов. Мы признательны нашим помощникам Г.

Агню, Д. Хиллу, Г. Лихтенбергеру, Дж. Миллеру, Р. Ноблсу. У. Найру, Г. Кубичеку, Л. Сэвитцу и В. Штурму, на которых пала основная тяжесть этих измерений.

Материалы, которые предполагалось использовать для получения цепной реакции, должны были подвергаться проверке по двум направлениям. Во-первых, было необходимо определить коэффициент размножения для примененного типа уран-графитовой системы. Во-вторых, следовало испытать достаточно большие образцы действительных конструкционных материалов, чтобы гарантировать отсутствие плохих партий урана или графита, которые могли бы уменьшить коэффициент размножения. В нашем случае эта задача осложнялась еще и тем, что в первом котле, использующем цепную реакцию, должны были использоваться три различные уран-графитовые системы.

Определение коэффициента размножения

Целью экспоненциального эксперимента является определение коэффициента размножения k бесконечной решетки из урановых блоков в графите, не прибегая к построению котлов очень больших размеров. Из таких экспериментов были определены оптимальные характеристики ячеек для прессованной окиси UO_2 (плотность 6.1 г/см^2) и для литого металлического урана (плотность 18 г/см^2). Были определены также значения k , присущие таким оптимальным решеткам в графите худшего качества, чем графит, использованный для сооружения котла. Для проектирования котла было необходимо определить значение k для трех типов структуры: литой металлический уран в графите AGOT; прессованная окись UO_2 в графите AGOT; прессованная окись UO_2 в графите Speer. В этом разделе будет дано описание экспоненциальных сборок, созданных для испытания этих структурных типов, и указаны результаты измерений на них.

В кратком изложении теория экспоненциального эксперимента выглядит следующим образом.

Если уран-графитовая решетка имеет сечение в форме квадрата со стороной a и полубесконечную высоту, а источник быстрых нейтронов находится в центре основания, то в точках, достаточно далеко отстоящих от источника, интенсивность нейтронов подчиняется уравнению

$$n = \sum_{ij} B_{ij} e^{-x/b_{ij}} \cos \frac{i\pi y}{a} \cdot \frac{j\pi z}{a}, \quad (1a)$$

Ось x совпадает с вертикальной осью сборки, а плоскость $x = 0$ – с основанием сборки. Итак, в точках, находящихся на оси, каждая гармоника нейтронной интенсивности убывает экспоненциально

$$n = B_{ij} \exp(-x/b_{ij}), \quad (2a),$$

где b_{ij} – длина релаксации. На достаточно больших расстояниях от источника существенно только первая гармоника. Длина релаксации $b(b_{11})$ связана с коэффициентом размножения следующим соотношением:

$$K = \left[1 - \frac{\lambda\Lambda}{3} \cdot \left(\frac{1}{b^2} - \frac{2\pi^2}{a^2} \right) \times \exp \left\{ \frac{r_0^2}{4} \cdot \left(\frac{1}{b^2} - \frac{2\pi^2}{a^2} \right) \right\} \right], \quad (3a)$$

где λ – средний свободный пробег тепловых нейтронов в графите; Λ – средний свободный пробег для столкновений, приводящих к поглощению; $r_0^2/4$ – возраст нейтронов, становящихся тепловыми. Далее

$$\left(\frac{1}{b^2} - \frac{2\pi^2}{a^2} \right) = \frac{1}{c^2},$$

где c – длина диффузии. Если k близко к 1, то c очень велико, а $1/c^2$ – мало, так что можно записать

$$K = \left[1 - \left(\frac{\lambda\Lambda}{3} + \frac{r_0^2}{4} \right) \cdot \left(\frac{1}{b^2} - \frac{2\pi^2}{a^2} \right) \right] \quad (4a)$$

или

$$K = \left(1 - \frac{L^2}{c^2} \right), \quad \text{where } L^2 = \left(\frac{\lambda\Lambda}{3} + \frac{r_0^2}{4} \right). \quad (5a)$$

Итак, если известна длина миграции L , то измерение длины релаксации b , связанной с первой гармоникой нейтронной интенсивности, позволяет установить значение коэффициента размножения для решетки бесконечных размеров такого типа, который был испытан.

Вследствие конечной высоты фактической экспоненциальной сборки (124 дюйма) в измерения нейтронной интенсивности должны вноситься две поправки. Это, во-первых, “поправка на гармоники”, связанная с присутствием высших гармоник в точках вблизи источника; и, во-вторых, “концевая поправка”, появляющаяся из-за близости точек, в которых производятся измерения, к верхнему торцу сборки.

Для измерения длины релаксации b индиевые фольги (0.0924 г/см^2) располагаются в различных положениях вдоль оси сборки, и с помощью

счетчика Гейгера–Мюллера измеряется наведенная в них активность с периодом полураспада 54 мин. При этих экспериментах фольга помещалась в никелевый держатель, так что активация A_{Ni} была обусловлена как тепловыми нейтронами, так и нейтронами с энергией индиевого резонанса. (Во все измерения вводилась поправка для приведения к бесконечно большому времени облучения.) Испускание нейтронов при спонтанном делении урана приводит к появлению фона, который должен быть вычтен из результатов измерений интенсивности. Окончательно, после введения гармонических и концевых поправок величина b вычисляется по формуле

$$b = \frac{D}{\ln\{(A_{Ni})_2/(A_{Ni})_1\}}, \quad (6a)$$

где D – расстояние между двумя положениями, в которых измерялись A_{Ni} .

При вычислении k по формуле (4а) в качестве длины стороны a должно использоваться расстояние между точками, в которых нейтронная интенсивность действительно обращается в нуль. (Вследствие конечности длины среднего свободного пробега Эффективное значение a можно оценить по измерениям нейтронной интенсивности вблизи границ сборки.

Длина миграции L [соотношение (5а)] может быть вычислена по плотности графита и кадмиевому отношению. (...)

Некоторые общие характеристики трех интересующих насборок были одинаковы. Сборка возводилась на основании (из графита AGX) высотой 16 дюймов, в верхнем слое которого делался канал для источника. Использовались четыре источника (Ra + Be) быстрых нейтронов, каждый приблизительно по 0.5 г. Они соединялись по два, образуя два источника почти точно по 1 г. Оба этих источника помещались в канал, причем каждый из них располагался примерно посередине между центром и краем сборки. При таком расположении нечетные гармоники интенсивности нейтронов в точках оси сборки сокращались, что существенно уменьшало гармонические поправки к результатам измерений. Решетка с размерами $99 \times 99 \times 123 \frac{3}{4}$ дюйм³ состояла из 15 слоев (высоты $4 \frac{1}{8}$ дюйма каждый) графита с включениями урана, перемежающихся 15 слоями сплошного графита. В горизонтальных плоскостях, находящихся в четных графитовых слоях, были проделаны измерительные щели, простирающиеся до центра сборки.

Для исключения влияния медленных нейтронов, попадающих обратно в сборку после рассеяния на окружающих предметах, верхний торец

и боковые стороны сборки защищались листовым кадмием.

Для указания положения точки, в которой производились измерения, были приняты следующая система координат и единицы длины. начало координат помещается в центре основания решетки; ось x направляется по оси сборки; ось y – по прямой, на которой находятся источники; ось z – в направлении измерительных щелей. За единицу длины бралась основная постоянная решетки (равная также расстоянию между двумя слоями сборки), которая в описываемых сборках составляла 8.25 дюйма.
(...)

Основные результаты измерений в рассмотренных выше трех сборках приведены в табл. IX.

Таблица IX. Результаты измерений на различных сборках

Номер сборки	Форма урана		Графит	Кадмиевое отношение	Множитель теплового использования	b , см	$\frac{10^6}{c^2}$ см ⁻²	L^2 , см ²	k
18	UO ₂	Speer 6.4	6.32	0.866	62.74	45	712	1.032	
27	UO ₂	AGOT	6.4	6.67	0.869	64.52	58.9	666	1.039
29	Металл	AGOT (партии N 10, 11)	5.1	6.56	0.871	71.10	101.2	700	1.07

Измерения сечения графита

Точные измерения сечения захвата нейтронов в графите, который должен быть использован для сооружения котла, необходимы по двум причинам. Во-первых, если поглощение в графите слишком велико, то цепная реакция может оказаться невозможной, либо потребуются сооружение котла настолько больших размеров, что они окажутся практически недостижимыми. Во-вторых, поскольку действие поглощения пропорционально квадрату нейтронной плотности, то при использовании в центре котла материала с малым сечением уменьшаются размеры системы. По этим соображениям испытаниям были подвергнуты все сорта графита, использованные для сооружения котла.

(...) Для этих испытаний было сооружено несколько σ -призм, описание которых дано в следующем разделе.

Описание σ -призм

Почти все призмы строились на основании из графита Speer, имеющем сечение около 5×5 фут² и высоту около 3 футов. Через середину центрального слоя этого основания, параллельно стороне, проходила щель для источников 10×10 см². Сверху к этому основанию были прикреплены графитовые бруски 0.25×0.25 дюйм², расположенные в 12 дюймах друг от друга. На эти бруски укладывался слой графита Speer или AGX, так что оставался 0.25-дюймовый зазор, куда мог вставляться кадмий. Этот слой, вообще говоря, состоял не из того сорта графита, на котором делались измерения. Делалось это только потому, что в нашем распоряжении имелись достаточно длинные бруски примененного материала. Над указанным слоем укладывалось 15 слоев из графита, подлежащего проверке. Щели для детекторов делались в верхней части 3-б 6- и 9-го слоев. Эти щели, обозначавшиеся соответственно 1, 2 и 3, проходили через вертикальную ось призмы перпендикулярно направлению щели для источника. Это было сделано для того, чтобы небольшие неточности в постановке фольг минимально сказывались на результатах измерений, и для того, чтобы по возможности уменьшить облучение оператора, работающего с фольгами. Вся призма выше зазора покрывалась кадмием, чтобы уменьшить до минимума количество тепловых нейтронов, попадающих в призму со стороны.

Размеры верхней части призм, построенных для измерения графита AGX, US и Speer, составляли около $5 \times 5 \times 5$ фут². Призмы для остальных сортов Speer и призм для AGOT имели размеры около 168×157 см² при высоте 157 см.

Теория

Плотность тепловых нейтронов n в графитовой структуре при наличии источника описывается следующим дифференциальным выражением

$$D \cdot \Delta n - (1/t) \cdot n + q = 0, \quad (1)$$

где $\Delta = \lambda v/3$ – коэффициент диффузии; λ – средний свободный пробег относительно рассеяния; v – скорость нейтронов; t – среднее время жизни теплового нейтрона, а q – плотность нейтронов, становящихся тепловыми. Если сделать измерения, поставив кадмий в зазор, а затем убрав его, то получим два уравнения для двух значений плотности n_1 и n_2 . Вычитая эти уравнения одно из другого и обозначая $n = n_1 - n_2$,

получаем

$$D \cdot \Delta n - (1/t) \cdot n = 0, \quad (2)$$

или

$$L^2 \Delta n - n = 0,$$

где $L = \sqrt{Dt}$ – длина диффузии.

Приведем решение этого уравнения для прямоугольной призмы со сторонами $[a - (2\lambda/\sqrt{3})]$, $[b - (2\lambda/\sqrt{3})]$ и $[Z - (\lambda/\sqrt{3})]$, параллельными осям x, y, z соответственно. При этом примем в качестве граничных условий $n = 0$ при $x = \pm a/2$, $y = \pm b/2$, $z = Z$. Тогда решение имеет вид

$$n = \sum_{lm} B_{lm} \cos \frac{l\pi x}{a} \cdot \cos \frac{m\pi y}{b} \cdot \left(e^{-z/b_{lm}} - e^{-2Z-z/b_{lm}} \right). \quad (3)$$

Величина b_{lm} – расстояние на котором в призме бесконечной длины гармоника lm уменьшится в e раз, – связана с L следующим соотношением

$$\frac{1}{L^2} = \frac{1}{b_{lm}^2} - \pi^2 \cdot \left(\frac{l^2}{a^2} + \frac{m^2}{b^2} \right). \quad (4)$$

На вертикальной оси призмы первая гармоника нейтронной плотности пропорциональна величине

$$e^{-z/b_{11}} - e^{-(2Z-z)/b_{11}}.$$

Второй член в этом выражении соответствует отражению от верхнего торца призмы и для бесконечно высокой призмы равен нулю. Поэтому для введения поправки на бесконечность высоты призмы все значения интенсивности на оси должны быть умножены на выражение

$$\frac{1}{1 - e^{-2(Z-z)/b_{11}}}, \quad (5)$$

(так называемая “концевая поправка”).

Соотношение (4б) позволяет отыскать L . Для этого надо либо измерить b_{11} далеко от источника, где малы высшие гармоники, либо ввести поправки на гармоники в значения b_{11} , найденные ближе к источнику, где легче измерять интенсивность.

Это делается следующим образом. Оценив значение L , из соотношения (4б) вычислим релаксационные длины для каждой гармоники. Далее, записав равенство (3б) для точек оси z , получим

$$n = \sum_{lm} B_{lm} \cdot \left(e^{-z/b_{lm}} - e^{-(2Z-z)/b_{lm}} \right).$$

Если два одинаковых источника расположены при $x = \pm a/4$, то надо сложить два таких решения, причем появляется множитель $\cos(l\pi/4)$. Тогда на оси z гармоника 1 3 сокращается с гармоникой 3 1, а гармоника 1 5 – с гармоникой 5 1. Из высших гармоник первой, со знаком минус, появится гармоника 3 3.

С хорошей точностью можно записать

$$n = B_{11} \cdot (e^{-z/b_{11}} - e^{2Z-z}/b_{11}) - B_{33} \cdot (e^{-z/b_{33}} - e^{-(2Z-z)/b_{33}}) + \dots$$

Следовательно, множитель, учитывающий поправку на гармоники, составляет

$$\frac{B_{11}}{n} \cdot (e^{-z/b_{11}} - e^{-(2Z-z)/b_{11}}).$$

Для σ -призм, использованных при измерении сечения графита АГОТ, поправки на гармоники и концевые эффекты составляли в целом 1.0056 для щели 1 и 1.0131 для щели 3.

Измерения

Для измерений использовались индиевые фольги площадью 26 см² и толщиной 92,4 мг/см². Для измерения активности трех фольг, ставившихся в каждую из трех щелей при наличии и отсутствии кадмия в зазоре, применялись два счетчика. Времена облучения выбирались такими, чтобы начальная скорость счета не превышала 1500 имп/мин. Измерения начинались через три минуты после вынимания фольг из сборки и в большинстве случаев продолжались до тех пор, пока не набиралось не менее 20 000 импульсов. Затем вычислялась начальная активность, приведенная к бесконечному времени облучения, для чего использовалось значение периода полураспада 54 мин. Поскольку чувствительности счетчиков были неодинаковы, результаты одного из них умножались на коэффициент (представляющий отношение чувствительностей), определенных по измерениям на ряде призм. Средние активности в щелях 1 и 3 исправлялись на гармоники и “концевые” эффекты, как указывалось в предыдущем разделе. Обозначая эти исправленные интенсивности через I_1 и I_3 соответственно, получаем для определения b_{11} следующую формулу

$$b_{11} = Z_{13}/\ln(I_1/I_3),$$

где Z_{13} – расстояние между щелями 1 и 3. Для вычисления длины диффузии использовалось соотношение (46) предыдущего раздела. Эти значения для каждого испытанного сорта графита приведены в графе 2

табл. X. В графе 1 указывается наименование сорта, указанное в виде клейма на каждом куске. ⟨...⟩

ТО 1 обозначает первую партию графита AGOT, ТО 2 – вторую и т.д., вплоть до 15-й партии. В графе 3 указывается значение длины диффузии для плотности 1.600 г/см^3 , а в графе 4 – сечение, вычислявшееся по формуле

$$\sigma_a = \frac{12.8 \times 10^{-24}}{L_{1.6}^2}.$$

Таблица X.

Длина диффузии и сечения поглощения для различных сортов графита.

Графит	L	$L_{1.6}$	$\sigma_a \times 10^{24}$	Графит	L	$L_{1.6}$	$\sigma_a \times 10^{24}$
SP 1	49.53	48.35	0.00549	T 11	51.16	51.70	0.00479
SP 2	49.77	47.93	0.00563	T 12	49.86	50.42	0.00504
SP 2'	50.53	48.63	0.00541	T 14	50.14	50.67	0.00499
ТО 1	50.32	50.64	0.00499	T 15	49.71	50.96	0.00493
ТО 0, 2, 3, 4, 5, 6	48.95	49.71	0.00518	AGX	43.25	43.79	0.00668
ТО 8, 9, 13	49.74	50.49	0.00502	US	4457	4479	0.00638
T 10	50.83	51.40	0.00484				

Следует отметить, что наилучшими качествами обладали партии графита T 10 и T 11. Эти партии и партия ET 14 были использованы для сердцевины. Остаток AGOT был использован для выкладки грубой формы сферы вокруг нее. Далее размещался графит SP 2 и SP 2'. На самой периферии котла попеременно использовался графит US и GX 2.

Прессование окиси урана

Большая часть котла содержит блоки двуокиси урана. Она изготовлялась из рыхлого сухого порошка UO_2 с помощью штампа и гидравлического пресса. Основная задача состояла в конструировании штампа. ⟨...⟩ После накопления некоторого опыта в обращении со штампами оказалось возможным на одном прессе изготавливать 400–500 брикетов за 8-часовой рабочий день.

Обработка графита

Изготовители поставляли графит в чушках сечением $4\frac{1}{4} \times 4\frac{1}{4}$ дюйм² и длиной от 17 до 50 дюймов, поверхность которых была не обработана. Было необходимо получать из них бруски стандартной длины с гладкими поверхностями.

Для этой цели использовались обычные деревообделочные станки. ⟨...⟩ Поверхности выдерживались с точностью ± 0.005 дюйма, а длина – с точностью ± 0.020 дюйма. ⟨...⟩ На этом участке за 8- часовой рабочий день можно было обработать около 14 тонн материала. Общая наша потребность составляла 40 000 брусков.

Следующая операция по обработке графита состояла в просверливании лунок диаметром $3\frac{1}{4}$ дюйма, имевших фигурное основание. Эти лунки были необходимы для размещения в графите брикетов UO_2 . Лунки сверлились за одну операцию. ⟨...⟩

Единственной трудностью в этой операции оказалось то, что сверла требовали частой заточки. Наиболее устойчивыми оказались карборундовые сверла, но их изготовление требовало больших усилий; поэтому они не применялись. Наиболее удовлетворительно зарекомендовали себя сверла из старых напильников; ими без заточки сверлилось около 60 лунок. Фактическое сверление лунки отнимало около 20 сек, так что обычная скорость этой операции составляла 60–100 лунок в час. Всего было сделано 22 000 лунок.

Конструкция котла

Отдельная ячейка уран-графитовой решетки имела размер 8.25 дюйма и объем 0.324 ^3 . Для получения такой решетки графитовые бруски обрабатывались до сечения $4\frac{1}{8} \times 4\frac{1}{8}$ дюйм² и длины $16\frac{1}{2}$ дюйма. Котел проектировался в виде сферы с максимальным радиусом 13 футов. Выбор сферической формы диктовался тем обстоятельством, что для структуры другой формы, в которой пошла бы цепная реакция, вероятно, не хватило бы имевшихся в нашем распоряжении материалов. Решение строить сферу повлекло за собой два важных дополнения. Во-первых, это была деревянная рама, в которую встраивался котел. Во-вторых, для поддержания той стороны котла, через которую проходили управляющие стержни, делался контрфорс из графита. Считалось вполне вероятным, что после возведения всей структуры деревянная рама может покособиться или усохнуть, что вызовет смещение графита, опирающегося на

нее. Поскольку это могло помешать введению управляющих стержней в котел, та часть котла, через которую проходят управляющие стержни, была сделана целиком опирающейся на графитовый контрфорс. Первоначально планировалось поддерживать вакуум в котле. Поэтому пришлось затратить значительные усилия для того, чтобы добиться плотного прилегания деревянной рамы к графиту и чтобы поверхность рамы по отношению к окружающей ее прорезиненной оболочке была гладкой и непрерывной. Впоследствии оказалось, однако, что в вакууме нет необходимости, поэтому такие старания оказались лишними.

Сфера встраивалась в куб со стороной 24 фута 2 дюйма. Отсюда следует, что некоторая – составляющая довольно малую долю полного объема – часть сферы диаметром 26 футов была обрезана. По плану сфера должна была окружаться оболочкой толщины 1 дюйм из графита, в котором не размещался уран, – так называемого “мертвого” графита. Как ожидалось, уран-графитовая решетка будет иметь вид сферы диаметром 12 футов и полным объемом 7200^3 , т.е. структура должна была состоять примерно из 22 300 ячеек. (...) В табл. XI указано фактическое количество графита, пошедшее на сооружение котла, причем указаны также количества разных сортов графита.

Таблица XI.
Графит в котле

Поставщик	Сорт	Вес, фунт
National Carbon Co.	AGOT	510 000
Speer Graphite Co.		145 000
U.S. Graphite Co.	U.S.	32 000
National Carbon Co.	AGX	60 000
AGX + Speer (только контрфорс)		24 000
		<u>771,000</u> = 385.5 тонн

Таблица XII.
Уран в котле

Геометрическая форма	Состав	Вес, фунт	Плотность г/см ²	Число	Полный вес в котле фунт
Цилиндр 2 1/4-in	Металл	6.0	18	2060	12400
"Псевдосфера" 3 1/4-in.	UO ₂	4.72	6.10	14840	70000
"Псевдосфера" 3 1/4-in.	U ₂ O ₃	3.99	5.17	1200	4790
Цилиндр 3-in.	UO ₂	4.56	6.14	540	2460
Цилиндр 3-in	U ₃ O ₈	3.97	5.20	840	3340
				19480	92990 = 46.5 тонн

Графит марок US и AGX имел несколько иные размеры, чем основная часть графита, и вследствие худшего качества был использован главным образом в наружной оболочке, в качестве "мертвого" графита.

Подробные сведения об урановых блоках приведены в табл. XII. В графе 1 указывается геометрическая форма блоков. Обозначение "псевдосфера 3 1/4 дюйма" относится к брикетам в форме цилиндров диаметром 3 1/4 дюйма и высотой 3 1/4 дюйма, края которых обрезались под углом 45°, так что их форма близка к сферической. Обозначение "цилиндр 3 дюйма" относится к блокам в форме цилиндров диаметром и высотой по 3 дюйма. Поскольку применялось 5 видов блоков и четыре сорта графита, при построении ячеек были возможны различные комбинации. (...)

На рис. 4 приведена фотография 19- и 18-го слоев котла. Видна приблизительно сферическая форма структуры, а также часть поддерживающей ее деревянной рамы. Построение решетки в вертикальном направлении достигается установкой "мертвого" слоя графита между двумя слоями, в которых размещается уран. Фотография относится к тому моменту, когда укладка 19-го слоя была еще не закончена.

Было сделано 10 целей, проходящих через весь котел. Три из них, вблизи центра котла, используются для управляющего и аварийных стержней, остальные можно использовать для экспериментов. Кроме того, один проходивший близко к центру котла ряд брусков, в которых находился уран, был устроен таким образом, что он мог полностью выниматься из котла. такая конструкция позволяет удалять образцы из котла и полезна для экспериментальных целей.

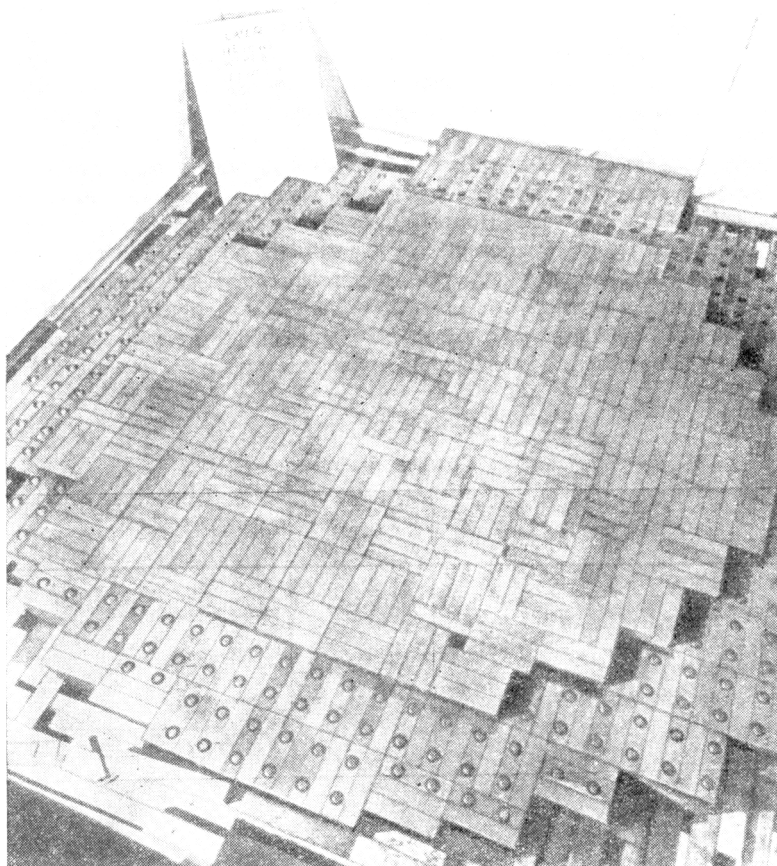


Рис. 4: Один из слоев котла

Приложение II

Мониторирование первого котла и управление им.

Х. Бартон, Т. Брилл, С. Фокс, Д. Фроман, У. Хинч, У. Канне,
У. Овербек, Х. Парсонс, Г. Павлицкий, Л. Слотин,³ Р. Уатте, М.
Вилькенин,
В. Вильсон

³Луи Слотин погиб в мае 1946 г., получив смертельную дозу облучения при несчастном случае во время эксперимента с критическими сборками в Лос-Аламосе. – Прим. ред.

Разработка и эксплуатация оборудования для мониторинга первого котла и управления им входила в обязанности электрогруппы. Эта работа была разделена следующим образом:

- 1) мониторинг котла во время сооружения;
- 2) мониторинг котла во время работы;
- 3) управляющие стержни;
- 4) автоматика.

1. Мониторинг котла во время сооружения

В 1-м слое была сделана щель сечением $2\frac{1}{2} \times 2\frac{1}{2}$, проходившая от поверхности котла (обращенной на север) несколько дальше центра котла. В этой щели у центра 11-го слоя (в графитовом блоке $2 \times 2 \times 12^3$) размещался пропорциональный счетчик с ВФ₃. Число счетчиков в единицу времени регистрировалось с помощью пересчетной системы ($\times 128$) и интегратора импульсов, подсоединенного к записывающему миллиамперметру. Таким образом непрерывно записывалась история сооружения котла. Интегратор приводил в действие также аварийное реле.

На рис. 5 показан рост числа отсчетов в минуту по мере укладки слоев.

2. Мониторинг котла во время работы

Когда размеры котла стали приближаться к критическим, для мониторинга котла стали использоваться также второй пропорциональный счетчик с ВФ₃ и четыре ионизационные камеры с ВФ₃. Сигналы, снимаемые с этих ионизационных камер, приводят в действие стержень автоматического управления и аварийные стержни. Усиленный ионизационный ток используется для запуска самопишущего индикатора мощности. Одна камера питается от батарей. Остальные три камеры питаются от обычных выпрямительных блоков с газоразрядными стабилизаторами. Напряжение, подаваемое на эти блоки, регулируется с помощью трансформаторов. На рис. 6 приведена схема электрических цепей ионизационной камеры, изображающая два первых усилительных каскада и блок питания. На схеме показаны как выходные клеммы для самопишущего индикатора, так и выходные клеммы для усилителей управляющего

и аварийных стержней. В действительности же для различных целей использовались разные установки. {...}

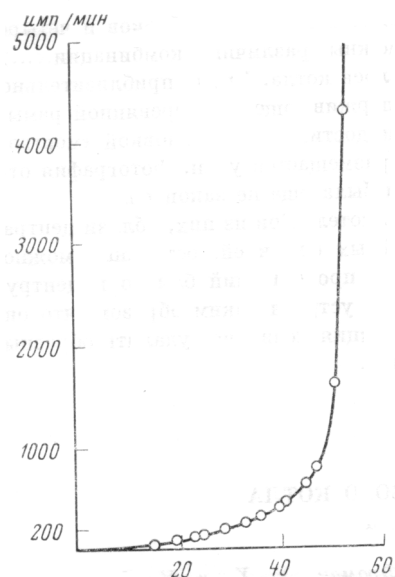


Рис. 5: Изменение интенсивности во время сооружения котла

Опыт, накопленный при эксплуатации котла, выявил некоторые недостатки описанных приборов. Ниже перечислены эти недостатки вместе с краткими предложениями по усовершенствованию. Любой усовершенствованный прибор следует испытать на работающем котле прежде, чем будут строиться подобные приборы для следующих котлов.

1. Камеры слишком велики, так что с ними трудно обращаться, и излишне велики с точки зрения требований чувствительности. По-видимому, вместо объема 18 л достаточно 2 л.

2. Слишком велика зависимость выходного сигнала от напряжения в сети. {...} Следует использовать триод-пентодный стабилизатор напряжения, отказавшись от регулирующих трансформаторов и стабиловольтов.

3. Во втором каскаде вместо лампы 1N5 следует использовать более мощную лампу, например, 6J7. Это позволит включить самопищущий миллиамперметр (на 1 ма) в качестве вольтметра непосредственно на анод лампы, а не косвенно в анодную цепь. Несомненным преимуществом такого способа включения является то, что при этом можно добиться более строгой пропорциональности между показаниями приборов

3. Управляющие стержни

Так как мощность, развиваемая котлом, в котором происходит цепная реакция, пропорциональна плотности нейтронов, то управлять котлом можно, влияя на плотность нейтронов. В первом котле это достигалось с помощью стержней из кадмия и боросодержащей стали. Для изменения доли нейтронов, поглощаемых в этих стержнях, они выдвигались в котел или выдвигались из него.

Несколько кадмиевых стержней было введено в котел во время его сооружения. Когда котел приобрел достаточно большие размеры, чтобы смогла пойти цепная реакция, то эти стержни удалялись из котла один за другим. Процесс запуска описан в основном разделе отчета. Три стержня имели особую конструкцию. <...>

Конструкция первого аварийного стержня была сделана более сложной, чем это оказалось необходимо, по следующим причинам. Во-первых, сначала полагали, что котлу придется работать в вакууме; поэтому стержень был встроен в вакуумно плотный стальной кожух с вынесенным управлением. Во-вторых, считалось, что надо добиться введение стержня в котел менее чем за секунду. В-третьих, думали что внутри котла будет высокая температура, так что нельзя было использовать канаты, а в стальном тросе поглотилось бы слишком много нейтронов. Вследствие таких ограничений стержень нельзя было протягивать через весь котел. В-четвертых, требовалось, чтобы стержень мог выдвигаться до любого желаемого положения.

Для удовлетворения второго и четвертого требований на стержень ставился захват, который зацеплялся за бесконечную цепь. Это зацепление происходит тогда, когда соленоид находится под напряжением. Электрические цепи сконструированы так, что зацепление возможно, только если интенсивность нейтронов мала. Следовательно, нельзя вывести стержень из котла, если цепь не подтверждает, что эта операция безопасна. Когда ток в соленоиде прерывается, захват освобождается и падающий груз увлекает за собой только стержень, а механизмы выведения стержня остаются в покое. Это помогает ускорить движение. <...>

Более простой аварийный стержень был построен, когда стало очевидным, что в работе котла под вакуумом не будет необходимости. Этот стержень выдвигается и останавливается вручную, но не может быть освобожден с пульта управления или сигналом аварийных цепей.

Управляющий стержень был сделан в виде "сэндвича". Центральная его часть содержала 1.5 весовых процента бора.

Опыт эксплуатации стержней показал, что управляющие стержни и аварийные стержни должны монтироваться на достаточно жестких основаниях, чтобы удары аварийных стержней не смещали установку управляющих стержней. Был сконструирован пневматический аварийный стержень, который будет испытан во втором котле. Конструкция управляющего стержня, по-видимому, удачна. Для второго котла мы намереваемся внести изменения лишь в приводы и передачу от двигателя. Интересующиеся могут получить подробные чертежи механических деталей этих стержней.

4. Автоматика

В этом разделе мы обсудим попытки использовать сигналы от контролируемых устройств для передвижения управляющих стержней.

Так как вначале ничего не было известно о том, как может повести себя первый котел, мы приготовили довольно сложную систему управления. Потом оказалось, что эта система может быть упрощена и усовершенствована, но зато при ее подготовке мы испытали самые разнообразные измерительные и управляющие устройства.

а. Измерения. Первый шаг на пути к автоматизации состоит в точном измерении. Мы располагали ионизационными камерами и пропорциональными счетчиками. И те и другие наполнялись фторидом бора. Для проверки этих приборов был найден простой метод. Помещая управляющий стержень в закритическое, а затем в подкритическое положение, мы вызывали рост и падение интенсивности по экспоненте. Такое изменение интенсивности в полулогарифмическом масштабе должно изображаться прямой линией. На рис. 11 приведены подробные графики для счетчика, тока ионизационной камеры и выхода усилителя ионизационной камеры. Видно, что наилучшим показывающим прибором является пропорциональный счетчик, который дает наиболее близкую к линейности кривую. Ионизационная камера, особенно при добавлении усилителя, далека от линейности, но приемлема как часть системы автоматического управления, так как ее показания воспроизводимы. (...)

б. Индикация. Одной из наиболее важных возложенных на нас задач была задача индикации условий работы котла. Поскольку невозможно оставаться вблизи котла при большой интенсивности, индикация как интенсивности, так и положения управляющего стержня должна быть дистанционной. Что касается интенсивности нейтронов, то мы приме-

няли дистанционную запись показаний четырех ионизационных камер и двух пропорциональных счетчиков. Схемы этих приборов приведены в другом месте данного отчета.

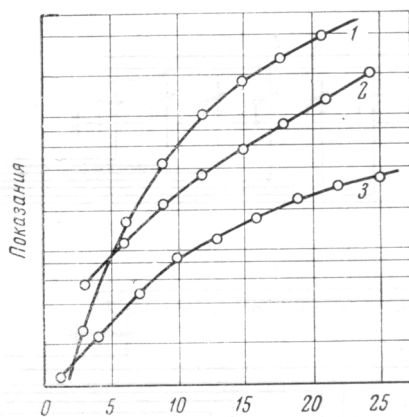


Рис. 7: Показания различных мониторирующих устройств

- 1 – ионизационная камера с усилителем;
- 2 – пропорциональный счетчик;
- 3 – ионизационная камера с гальванометром

На рис. 7 изображена система, применяемая для индикации положения управляющего стержня. Положение аварийного стержня указывается грубо, с помощью микропереключателей, расположенных вдоль его пути. Положение “регулирующего” стержня указывается более точно, с помощью сельсинов. Как видно из схемы, один сельсин-генератор соединен с механизмом передвижения регулирующего стержня и с двумя сельсин-моторами. Один из моторов приводит в движение стрелочный индикатор, а другой – перо самописца. С имеющимся устройством можно было установить стержень в любое положение с точностью не хуже 0.05 дюйма. Возможно добиться и большей точности, если увеличить передаточное отношение между сельсином и механизмом передвижения стержня.

в. Управление. Как упоминалось выше, в котле существует два типа управляющих стержней: аварийные и регулирующие. Электрическая схема, использовавшаяся для этих стержней, показана на рис. 8. Аварийный стержень может быть установлен в

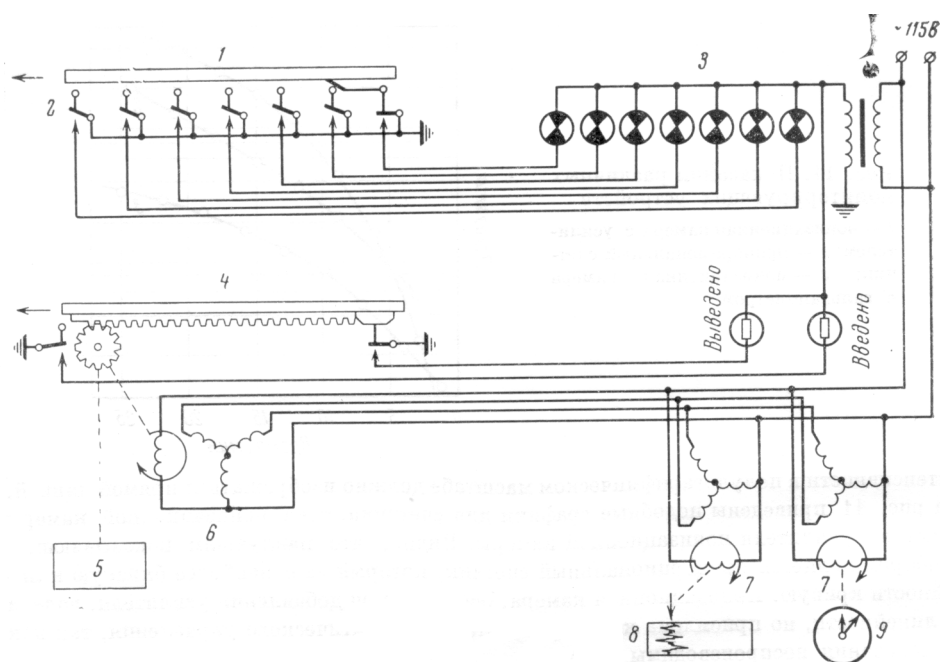


Рис. 8: Система индикации положения стержня

- 1 – аварийный стержень; 2 – микропереключатели;
- 3 – индикационные лампочки; 4 – управляющий стержень;
- 5 – привод; 6 – сельсин генератор;
- 8 – самописец; 9 – стрелочный индикатор

любое желаемое положение (обычно он полностью выдвинут). В этом положении он удерживается захватом, связанным с соленоидом. Как только через соленоид перестает течь ток, стержень освобождается и втягивается в котел под действием 100-фунтового груза.

Регулирующий стержень перемещается двумя моторами, один из которых служит для ввода, а другой – для вывода стержня. Использование двух моторов вместо одного с изменяемым направлением вращения вызвано требованиями автоматической регулировки, схема которой будет описана далее.

Одной из частей блока управления является автоматическая аварийная система. В нее входят два реле; нормально открытые контакты одного из них включены последовательно с соленоидом аварийного стержня, а нормально закрытые контакты другого – последовательно с мотором “ввод” регулирующего стержня. Эти реле питаются от общей цепи “ава-

рия!»⁴ При разрыве этой цепи в любой точке все стержни вводятся в котел. Ввод аварийных стержней занимает около 2 сек, а регулирующего стержня – 20 сек. Все аварийные устройства специально делались так, что их открытые контакты были включены

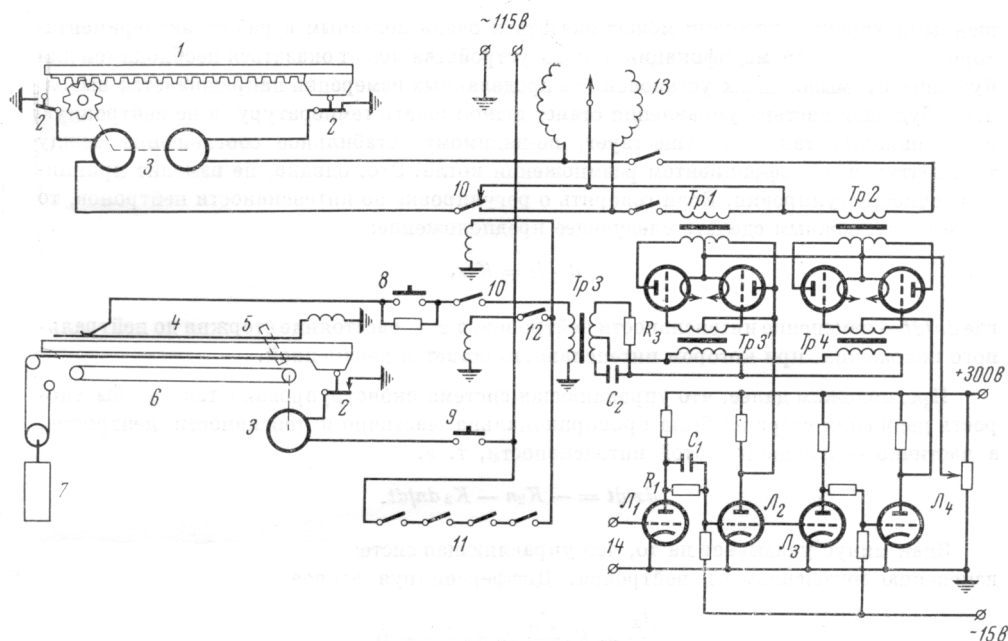


Рис. 9: Упрощенная схема блока управления

- 1 – управляющий стержень; 2 – ограничители;
- 3 – привод; 4 – аварийный стержень;
- 5 – захват связанный с соленоидом;
- 6 – цепная передача; 7 – груз;
- 8 – кнопка возврата; 9 – кнопка движения;
- 10 – реле; 11 – аварийные и другие реле;
- 12 – деблокировка линии “авария”;
- 13 – ручное управление;
- 14 – вход со схемы ионизационной камеры

последовательно в этой цепи “авария!”. В настоящее время установлены три автоматические аварийные цепи. Они работают от трех отдельных камер с ВФз и питают отдельные реле. Если хотя бы одно из реле обесточивается, то линия “авария!” разрывается и все стержни посылаются

⁴ Дословный перевод: “убирайся” (scram). – Прим. ред.

в котел.

Другой частью блока управления является система ручного управления котлом. Она состоит из отдельных выключателей, освобождающих аварийные стержни, кнопки включения мотора обратной тяги для аварийных стержней, переключателя, восстанавливающего положение захвата соленоида, и двух регуляторов скорости (для разных направлений) установки регулирующего стержня. Эти регуляторы осуществлены просто в виде варнака, обмотки которого распределены так, что она представляет переменную индуктивность, включенную последовательно с каждым из двигателей. Таким образом, направление движения зависит от направления поворота рукоятки вариака, а скорость движения зависит от угла поворота.

Наконец, в блок управления входит автоматическое устройство, предназначенное для поддержания постоянной интенсивности с помощью передвижения регулирующего стержня. Это устройство применялось мало, так как регулирование интенсивности вручную оказалось очень нетрудным делом. Однако автоматическое устройство с улучшенными характеристиками может оказаться очень полезным в работе экспериментаторов, а некоторая модификация такого устройства может оказаться необходимой для будущих промышленных установок. Из проведенных измерений напрашивается вывод, что в будущем система управления станет использовать температуру, а не нейтронную интенсивность, так как существует, по-видимому, стабильное соотношение между температурой и коэффициентом размножения котла. Это, однако, не изменит принципиальной точности регулировки. Если говорить о регулировке по интенсивности нейтронов, то кажется возможным сделать следующее предположение:

$$dn/dt = K_1 x,$$

где dn/dt – изменение интенсивности нейтронов, а x – расстояние стержня до нейтрального положения, при котором интенсивность остается неизменной.

Предположим далее, что управляющая система сконструирована так, чтобы скорость движения стержня была пропорциональна частично интенсивности нейтронов, а частично – изменению этой интенсивности, т.е.

$$dx/dt = -K_2 n - K_3 dn/dt.$$

Знак минус указывает на то, что управляющая система противодействует всякому изменению интенсивности нейтронов. Дифференцируя

второе уравнение, получаем

$$\frac{d^2x}{dt^2} + K_3 \cdot \frac{d^2n}{dt^2} + K_2 \cdot \frac{dn}{dt} = 0.$$

Производя подстановку из первого уравнения, находим

$$\frac{d^2x}{dt^2} + K_1 K_3 \cdot \frac{dx}{dt} \cdot K_1 K_2 x = 0.$$

Таково уравнение движения стержня. Любое начальное состояние может быть выражено через начальную ошибку в положении стержня, и надо разыскивать такое решение, такое движение стержня, которое приводит к ликвидации этого возмущения. Как было найдено, движение такого типа устойчиво при $K_3 > \sqrt{(K_2/K_1)}$. Если это условие не соблюдено, то управление окажется неустойчивым, колебательным. Если выяснится, что для работы при высоких интенсивностях целесообразнее пользоваться температурной регулировкой, то стержень можно заменить на систему охлаждения, а x будет тогда обозначать скорость охлаждения. Для увеличения интенсивности будет необходимо увеличивать поток охлаждающего вещества. По-видимому, наиболее вероятно, что потребуются комбинация регулировки по температуре и по интенсивности, так как регулировка только по температуре может привести к неправильным переходным условиям.

В примененной системе интенсивность нейтронов измеряется ионизационной камерой. Можно считать, что ее выходной сигнал в некотором интервале пропорционален интенсивности нейтронов. Этот сигнал усиливается лампой Л₁ (рис. 14) и затем проходит через цепочку из сопротивлений R_1 , R_2 и емкости C_1 . Эта цепочка подобрана таким образом, чтобы (в том интервале частотных компонент, которые присущи любому допустимому возмущению) на сетку следующей лампы Л₂ подавалось напряжение

$$e_q = K_4 n + K_5 dn/dt.$$

Постоянные K_4 , K_5 в этом уравнении определяются значениями R_1 , R_2 , и C_1 , которые могут быть подобраны так, чтобы добиться устойчивой работы всей системы. <...>

Итак, трансформаторы Tr_1 и Tr_2 совместно с тиратронами представляют автоматически изменяющийся импеданс, включенный последовательно с двигателями стержня. Вследствие того, что управляющие потенциалы, снимаемые с ламп Л₂ и Л₄, противоположны по знаку, увеличение интенсивности приводит к включению двигателя “ввод”, а уменьшение интенсивности – двигателя “вывод”.

Испытания этой системы показали, что с ее помощью можно добиться постоянства интенсивности в пределах $\pm 3\%$ при довольно больших возмущениях, например при вводе или выводе других стержней.

4. Выводы

Хотя накопленный нами опыт говорит о том, что простая регулировка вручную может обеспечить достаточно точное управление, он говорит также о том, что возможно осуществить стабильную систему автоматической регулировки, которая может быть сделана гораздо более точной, чем существующая система. Поэтому в план нашей будущей деятельности, который уже начинает осуществляться, включены исследования по дальнейшей разработке и усовершенствованию подобной автоматике с тем, чтобы она была готова к тому времени, когда в ней появится необходимость.

Получено 27 июня 1952 г.
Институт ядерных исследований
Чикагский университет,
Чикаго 37, Иллинойс