



Моделирование процесса регулирования и температурного изменения плотности воды в уран-водяных реакторах на промежуточных нейтронах

В. Б. Климентов, В. М. Грязев

В статье рассматриваются результаты опытов по физическому моделированию регулирования и температурного эффекта, обусловленного изменением плотности воды в уран-водяных реакторах на промежуточных нейтронах. Определена эффективность регулирующих стержней различного типа, получена зависимость критических размеров уран-водяных реакторов от плотности воды, заполняющей активную зону.

Введение

Физическое моделирование различных процессов в ядерных реакторах может осуществляться путем их имитации на критических сборках. Оно позволяет получить ряд сведений, необходимых при проектировании и конструировании ядерных реакторов, и обходится значительно дешевле проведения критических опытов в период пуска реактора. Физическое моделирование дает возможность произвести оценку оптимальной загрузки ядерного реактора для работы на полной мощности с большей точностью, чем при теоретических расчетах.

Значительный интерес представляют исследования температурного эффекта, обусловленного изменением плотности воды, и вопросов регулирования уран-водяных реакторов на промежуточных нейтронах. Авторами статьи проводилась работа по изучению указанных вопросов на критической сборке уран-водяной мультиплицирующей системы. Конструкция сборки и ряд экспериментов, выполненных на ней, подробно описаны в докладе, представленном на Вторую международную конференцию по мирному использованию атомной энергии [1].

В конструкции критической сборки была предусмотрена возможность изменения конфигурации и состава активной зоны отражателя и расположения регулирующих стержней.

Рабочими элементами критической сборки являлись пластины размером $250 \times 70 \times 2,7$ мм, спрессованные из смеси окиси-закиси урана (90% U^{235}) и полиэтилена. Пластины собирались по 5—8 штук в кассеты из нержавеющей стали. Кассеты закреплялись на макетном столике, образуя активную зону необходимой величины и формы. Объем одной рабочей кассеты составлял 0,62 л. Отношение числа ядер водорода к числу ядер U^{235} (Q_H/Q_{235}) изменялось от 17 до 50. Вблизи активной зоны располагались два полых кадмиевых стержня автоматического регулятора и два стержня аварийной защиты. Критическая сборка помещалась в алюминиевом баке диаметром 3 м и высотой 1,6 м. Бак имел приспособления для регулируемого заполнения водой и ее быстрого слива. Уровень воды измерялся с помощью водомерного стекла. Критическая сборка была оборудована необходимыми приборами для надежного контроля и управления процессом при всех режимах работы. Во время проведения экспериментов большое внимание уделялось вопросам ядерной безопасности.

1. Исследование эффективности регулирующих стержней

Экспериментальное определение эффективности регулирующих стержней несложно и легко осуществимо на критической сборке рассматриваемого типа при уровне мощности

не более 1 *вт*. Исследовались сплошной борный стержень (B_4C) диаметром 60 мм и полый кадмевый стержень того же диаметра со стенками толщиной 1 мм. Длина стержней равнялась 400 мм при высоте активной зоны мультиплицирующей системы, равной 250 мм. Измерения проводились для систем с водя-

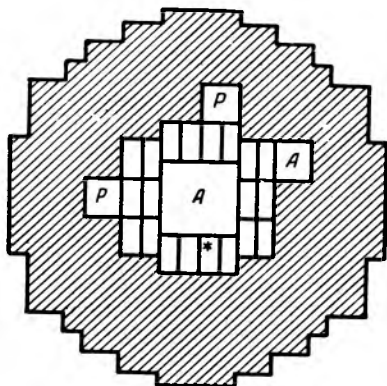


Рис. 1. Картogramма кольцевой уран-водяной системы с боковым отражателем из графита ($Q_H/Q_{235} = 31$):

Незаштрихованная часть—рабочие кассеты, заштрихованная часть—графит; P—регулирующие стержни; A—стержень аварийной защиты; *—подвижная кассета.

ным отражателем и графитовым боковым отражателем толщиной 210 и высотой 400 мм. Во всех случаях верхним и нижним отражателями являлась вода. Исследуемые стержни располагались на расстоянии 35, 70 и 140 мм от активной зоны. Измерения проводились на кольцевой мультиплицирующей системе с внутренней водяной полостью размером 140 × 140 мм. Картogramма системы для случая бокового отражателя из графита представлена на рис. 1. Стержни аварийной защиты надежно обеспечивали остановку системы при любом положении регулирующих и исследуемых стержней. Энергетический спектр нейтронов определялся отношением $Q_H/Q_{235} = 31$. Согласно работе [1] доля делений U_{235} , производимых нейтронами с энергиями, большими 0,4 эв, для такой системы составляла около 30%.

Методика измерений включала предварительную градуировку регулирующих стержней P с помощью подвижной рабочей кассеты. Для передвижения кассеты использовалось специальное устройство с ходовым винтом. При этом определялась эффективность кадмиевого и борного стержней, а так-

же рабочей кассеты. Опыт заключался в следующем. Включался автоматический регулятор, часть рабочей кассеты извлекалась из активной зоны. При этом стержни регулятора P автоматически поднимались вверх. Эффективность извлеченного участка регулирующих стержней предварительно оценивалась по времени удвоения мощности реактора. Аналогичные операции повторялись до полного извлечения рабочей кассеты из активной зоны. Контроль за перемещением стержней осуществлялся с помощью сельсинного указателя положения.

Эффективность $\Delta\rho$ одной рабочей кассеты в мультиплицирующей системе из 25 кассет с водяным отражателем составила 0,015, а в случае системы из 20 кассет с боковым отражателем из графита — 0,021. Градуировочная кривая для двух спаренных кадмиевых стержней, расположенных в боковом отражателе из графита вплотную к активной зоне, представлена на рис. 2.

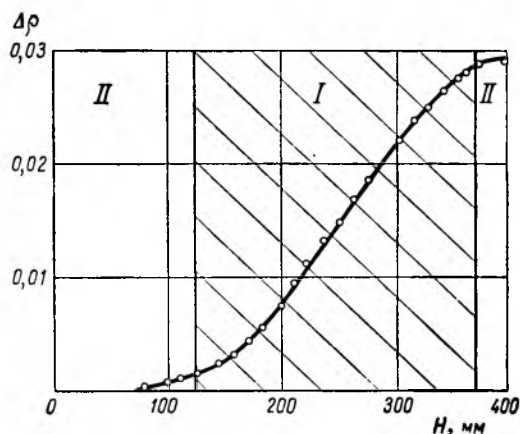


Рис. 2. Градуировка регулирующих стержней: I—активная зона; II—верхний и нижний водяные отражатели.

Эффективность борных и полых кадмиевых стержней оказалась практически одинаковой. Ее зависимость от расположения стержней относительно активной зоны, определяемая распределением тепловых нейтронов в отражателе, показана на рис. 3.

Для регулирования уран-водяных реакторов, работающих под давлением, может быть выгодным применение жидких поглотителей. Регуляторы с жидкими поглотителями не имеют подвижных частей, что может

значительно упростить конструкцию реакторов.

Экспериментальным путем произведена оценка эффективности ртутного поглотителя,

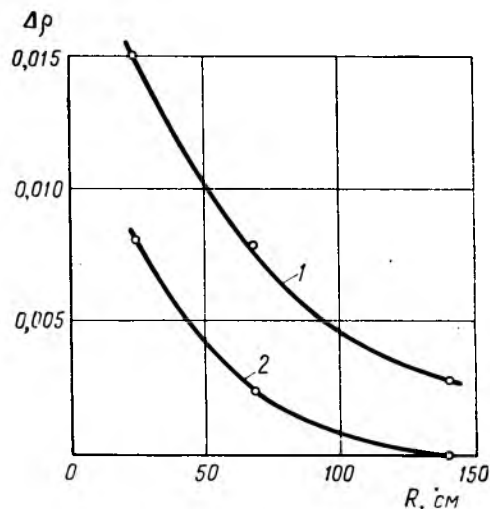


Рис. 3. Зависимость эффективности поглощающих стержней от расположения их относительно активной зоны:

1 — отражатель (210 мм графита); 2 — отражатель (вода).

расположенного в центре активной зоны уран-водяной системы с водяным отражателем. Картограмма системы приведена на рис. 4.

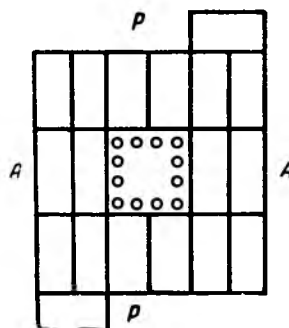


Рис. 4. Картограмма уран-водяной системы с ртутным поглотителем ($Q_H/Q_{235} = 25$):

Р — регулирующие стержни; А — аварийные стержни. В центре системы расположен ртутный поглотитель.

Энергетический спектр нейтронов мультиплицирующей системы определялся отношением $Q_H/Q_{235} = 25$. Число делений, производимых нейтронами с энергией, большей 0,4 эв, составляло при этом не менее 50% [1]. Ртутный поглотитель состоял из 12 медных трубок, заполненных ртутью (2,7 кг Hg). Он устанавливался вместо двух извлеченных рабочих кассет. Внешний и внутренний диаметры трубок составляли соответственно 10 и 8 мм, а высота — 400 мм. Трубки располагались по периметру квадрата со

стороной 53 мм. Разрушение меди под действием ртути не представляло опасности, так как время использования стержня не превышало одних суток. Постепенное извлечение ртутного поглотителя производилось при автоматическом управлении реактором, при этом изменение реактивности компенсировалось введением стержней регулирования и извлечением периферийных кассет. Для стержня, заполненного ртутью, $\Delta\rho' = 0,088$, без ртути — $\Delta\rho'' = 0,023$. Следовательно, эффективность 2,7 кг ртути при выбранной конструкции стержня в данной системе $\Delta\rho' - \Delta\rho'' = 0,065$.

2. Физическое моделирование температурного изменения плотности воды

Температурные изменения плотности воды приводят к увеличению длины миграции нейтронов и существенно изменяют физические характеристики уран-водяных реакторов. Изменения плотности воды в активной зоне ядерного реактора моделировались введением в пространство между рабочими пластинами специальных прослоек. Они изготовлялись из тонкой резиновой пленки на медном каркасе и наполнялись воздухом. Объемы воздуха и материала прослоек определялись по объему вытесненной ими воды. Расстояние между рабочими пластинами было мало по сравнению с диффузионной длиной нейтронов в воде и не превышало 3—4 мм, а толщина прослоек, содержащих воздух, составляла около 2 мм. Опыты по учету степени гетерогенности уран-водяных систем с пластинчатыми тепловыделяющими элементами, описанные в работе [1], показали, что при $Q_H/Q_{235} < 40$ такие системы можно рассматривать как однородные. В случае $Q_H/Q_{235} = 50$ влияние величины зазоров между рабочими пластинами в кассете на критические размеры систем не превышало 4%. Исследуемые уран-водяные системы являлись квазигомогенными. Таким образом, введение в их состав специальных прослоек, содержащих воздух, рассматривалось как соответствующее уменьшение плотности воды, заполняющей активную зону. Средняя плотность воды активной зоны подсчитывалась с учетом воздуха, находящегося в прослойках, и полиэтилена, входящего в состав рабочих пластин. Полиэтилен по замедляющим и диффузионным свойствам подобен обычной

воде. Его плотность составляла $0,9 \text{ г/см}^3$. Плотность воды, заполняющей рабочие каскеты, была равна 1 г/см^3 при рабочей температуре около 5°С . Плотность воды в отражателе оставалась постоянной.

Изучалось влияние изменения средней плотности воды в активной зоне на критические размеры мультиплицирующих систем при различных отношениях ядер замедлителя и горючего Q_H/Q_{235} . Влияние материала прослоек на критические размеры систем оценивалось путем проведения контрольных опытов.

Обычная процедура экспериментов заключалась в постепенной заливке водой заранее собранной активной зоны. Форма активной зоны выбиралась возможно более близкой к цилиндрической. Степень подкритичности системы определялась по зависимости $1/n$ от уровня воды в баке, где n — число отсчетов пусковой установки, регистрирующей плотность нейтронного потока вблизи активной зоны. Вблизи активной зоны постоянно находился Po-Be -источник нейтронов. Определялось такое количество каскет N , при котором система надкритична, а система с числом каскет $N-1$ подкритична.

Таким образом, ошибка ΔV в критических размерах составляла $\pm 0,31 \text{ л}$. Средняя плотность воды оценивалась с точностью до $\Delta \gamma = \pm 0,005 \text{ г/см}^3$. Результаты экспериментов с учетом поправки на материал прослоек приведены на рис. 5, где показана зависимость критического объема уран-водяных систем от Q_H/Q_{235} .

В случае систем со средней плотностью воды в активной зоне $\gamma = 1,0 \text{ г/см}^3$, $\gamma = 0,9 \text{ г/см}^3$ и $\gamma = 0,8 \text{ г/см}^3$ эта зависимость представлена соответствующими изоплотными линиями. На рис. 5 нанесены прямые постоянной концентрации U^{235} в исследованных системах для трех циклов опытов. Каждый цикл опытов проводился с одним и тем же количеством рабочих пластин в каскете (8, 6 и 5) и с различным количеством воздушных прослоек. Зависимость критических объемов уран-водяных систем от отношений плотностей замедлителя и горючего в интервале $Q_H/Q_{235} = 45 \div 20$ оказалась близкой к линейной. Проведенные опыты позволяют дать количественную оценку изменениям критических размеров уран-водяных мультиплицирующих систем на промежуточных нейтронах при изменении плотности воды, заполня-

ющей их активную зону. Установлено, что при концентрациях изотопа U^{235} 836, 627 и 523 г/л снижение плотности воды в активной зоне на $0,1 \text{ г/см}^3$ сопровождается увеличением критического объема на $\Delta V = (1,6 \pm 0,4) \text{ л}$, $\Delta V = (1,4 \pm 0,4) \text{ л}$ и $\Delta V = (1,2 \pm 0,4) \text{ л}$ соответственно. На основании опытов по регулированию мультиплицирующих систем данного типа произведена оценка соответствующего изменения реактивности $\Delta \rho/\Delta \gamma$. Эти изменения для трех рассмотренных слу-

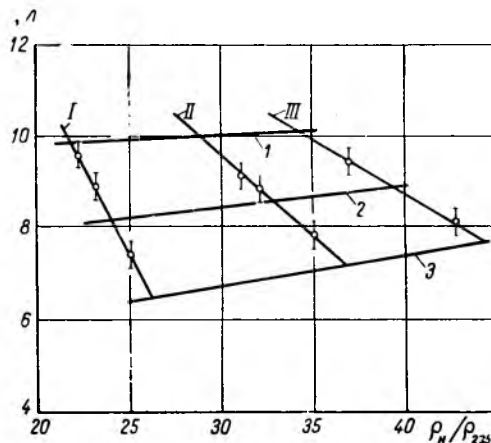


Рис. 5. Зависимость критических размеров уран-водяной системы от отношения Q_H/Q_{235} для различной плотности воды:

1, 2, 3 — плотность воды γ , соответственно равная 0,8; 0,9 и 1,0 г/см^3 ; I, II, III — концентрация U^{235} , соответственно равная 836, 627, 523 г/л .

чаев при изменении плотности воды в активной зоне на $0,1 \text{ г/см}^3$ оказались равными 0,030, 0,034 и 0,029.

В состав рабочих пластин входил полиэтилен с плотностью, отличной от плотности воды. Поэтому приведенные в работе [1] значения критических размеров уран-водяных систем на промежуточных нейтронах были несколько завышены. Из рис. 5 можно оценить поправку на различные плотности воды и полиэтилена в интервале $Q_H/Q_{235} = 45 \div 20$. Полученные результаты близки к результатам работы [2].

К сожалению, авторы не имели возможности провести прямые опыты по определению влияния полиэтилена на критические размеры исследованных систем, что особенно важно при малых значениях Q_H/Q_{235} .

В работе [1] оценивалось влияние различных конструктивных материалов на кри-

тические размеры уран-водяных систем. Было выявлено, что введение в активную зону алюминия при значениях $\rho_H/\rho_{235}=30\div 17$ резко увеличивает критические размеры системы.

Влияние алюминия и воздушных прослоек на критические размеры систем при $\rho_H/\rho_{235}<30$ в наших опытах оказалось таким же, как в работе [1]. При введении 190 г алюминия объемом 70 см³ в активную зону с концентрацией U²³⁵, равной 836 г/л, критический объем системы увеличился на $(3,2\pm 0,3)$ л. Опыты, проведенные с воздушными прослойками, показали, что уменьшение средней

плотности, соответствующее вытеснению 70 см³ воды, вызовет такое же изменение критических размеров системы, как и добавление в активную зону 190 г алюминия.

В заключение авторы выражают признательность С. М. Фейнбергу, осуществлявшему общее научное руководство, В. А. Цыканову за участие в обсуждении работы, а также А. Д. Меркулову, Н. Н. Колпакову, Б. А. Прядохину и другим сотрудникам, принимавшим участие в проведении экспериментов.

Поступила в Редакцию 12/III 1959 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. С. М. Фейнберг, Е. Д. Воробьев, В. М. Грязев, В. Б. Климентов, В. А. Цыканов, Н. Я. Лященко. Доклад № 2142, представленный на Вторую

- международную конференцию по мирному использованию атомной энергии (Женева, 1958).
2. D. Callihan. Nucleonics, 14, No. 7 (1956).

