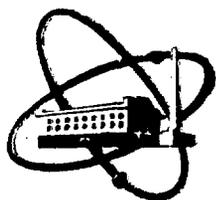


2 SU 8710360

В



ФЭИ-1795

ФИЗИКО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

*В. С. БЫКОВСКИЙ, М. Н. ЛАНЦОВ, В. И. ЛЕПЕНДИН,
О. Н. МАКАРОВ, В. И. МАТВЕЕНКО*

**Влияние гетерогенности размещения
поглощающих стержней в активной зоне
на формирование температурного эффекта
реактивности уран-водных сборок**

Обнинск — 1986

УДК 621.039.516.24

**В. С. Быковский, М. Н. Ланцов, В. И. Лепендин, О. И. Макаров,
В. И. Матвеевко.**

Влияние гетерогенности размещения поглощающих стержней в активной зоне на формирование температурного эффекта реактивности уран-водных сборок.

ФЭИ-1795. Обнинск: ФЭИ, 1986 г. — 12 с.

В данной работе приводятся результаты расчетно-экспериментальных исследований, полученных при изучении температурных эффектов реактивности (ТЭР) уран-водных сборок с $\rho_n / \rho_s \approx 130$ в зависимости от способа размещения гадолиниевых СВГ по сечению активной зоны: равномерно, в центре зоны и на ее периферии. Измерения ТЭР были проведены в подкритическом состоянии методом стреляющего источника. Расчеты были выполнены в двугрупповом диффузионном приближении с использованием (z, z) -геометрии в программах F АСТОР -3, ДНЕСТР и (z, φ) -геометрии с учетом реального местоположения СВГ в программе RFI-80. Исследования выявили заметную зависимость величины ТЭР от способа размещения СВГ в активной зоне в условиях конкурирующего вклада отражателя и поглощающих стержней в баланс реактивности сборки.

В В Е Д Е Н И Е

Данная работа представляет результаты расчётно-экспериментальных исследований, относящиеся к выявлению влияния способа гетерогенности размещения поглощающих стержней в активной зоне на эффективность этих стержней и на формирование температурных эффектов реактивности (ТЭР) уран-водных сборок, имеющих отрицательный знак по причине недозамедленности этих сборок. Исследования были проведены на сборках малого ($\sim 4 - 6$ длин миграции) размера с большим влиянием отражателя на их Кэф.

Два варианта сборок по отношению ρ_H/ρ_5 практически были одинаковы, но отличались размерами, количеством имитаторов поглощающих элементов и конфигурацией боковой границы активной зоны. В экспериментах использовался метод стреляющего источника / I / для определения реактивности сборок в подкритическом состоянии, что позволило приблизить эксперимент к схемам используемых методов расчёта.

ОПИСАНИЕ СБОРОК.

Эксперименты проводились на стенде МАТР-2, позволяющем изотермически разогревать исследуемые сборки до $300^{\circ}\text{C} / 2 /$. Твэлы типа ВВЭР диаметром 9,15 мм с двуокисью урана 5% обогащения по урану-235 высотой 60,7 см размещались в гексагональной решетке с шагом 12,9 мм внутри шестигранных циркониевых кассет с размером под ключ 128 мм. Кассеты располагались в гексагональной решетке с шагом 130 мм. Толщина стенок циркониевых кокухов кассет составляла 1,5 мм. В качестве поглощающих стержней использовались гадолиниевые СВЦ, оболочка которых диаметром 13,0 x 0,3 мм выполнена из нержавеющей стали (плотность окиси гадолиния $0,4 \text{ г/см}^3$). Имитаторы СВЦ имели аналогичные размеры и были заполнены окисью алюминия. СВЦ и их имитаторы размещались внутри кассет на месте извлекаемых твэл. Во всех сборках, на расстоянии 17 см от центра активной зоны, размещались 4 стальных герметичных чехла диаметром 24x2 мм для стержней СВЗ. В центре активной зоны стоял охлаждаемый воздухом герметичный канал $\phi 32$ мм, в котором размещался калифорниевый источник нейтронов мощностью $\sim 6 \cdot 10^7$ н/сек. Датчик нейтро-

нов СНМ-17 помещался в охлаждаемом канале $\varnothing 89 \times 4$ мм, расположенном в боковом отражателе на расстоянии ~ 48 см от центра активной зоны. Датчик и источник нейтронов размещались в горизонтальной плоскости по центру сборки. Активная зона с верхнего торца и с боков была окружена бесконечным водяным отражателем. Нижний торцевой отражатель на $\sim 80\%$ состоял из металлических концевых деталей.

Исследования проводились на двух вариантахборок, имеющих почти одинаковое отношение ρ_H/ρ_S (128 и 130). Сборки отличались формой боковой поверхности активной зоны и количеством стальных поглотителей в ней. Сборка радиусом 18,1 см содержала 20 имитаторов СВП, сборка радиусом 20,9 см - 49 имитаторов СВП и 24 пластины нержавеющей стали толщиной 1,5 мм между кассетами.

Картограммы исследовавшихсяборок и способов размещения в них гадолиниевых СВП, их имитаторов и пластин из нержавеющей стали представлены на рис. 1.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА. ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ.

Исследуемые сборки с $\rho_H/\rho_S \approx 130$, как правило, являются недозамещенными из-за недостатка ядер водорода в ячейке и обладают отрицательным ТЭР. Предлагаемая схема исследований позволяет проследить изменение ТЭР за счёт вариации отдельных параметров сборки. Для выявления характера закономерности обычно проводилась серия измерений в сборке одного размера, которая в отсутствие поглощающих элементов в ней (присутствуют только их соответствующие имитаторы) при $T = 20^\circ\text{C}$ являлась либо критичной, либо имела небольшую подкритичность.

Последовательная замена имитаторов на соответствующие поглощающие элементы при неизменной величине ρ_H/ρ_S позволяет проследить исследуемую закономерность. При этом все измерения проводились в подкритическом состоянии при неизменном взаимном положении источника и датчика нейтронов. Последнее обстоятельство позволяет полагать, что возможные систематические погрешности носят регулярный характер и изменяются с температурой одинаковым образом.

Контроль температуры при изотермическом разогреве сборки осуществлялся II хромель-копелевыми термопарами, равномерно распределенными по её объёму. Среднеквадратичная погрешность измерения температуры не превышает $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$.

Подкритичность сборки определялась с помощью модифицированного метода стреляющего источника / I /. Метод основан на анализе скорости спада плотности запаздывающих нейтронов в сборке после быстрого извлечения из неё источника нейтронов с помощью аналогового реактиметра типа ПАМИР. При этом обработка поведения нейтронного потока во времени ведётся в приближении односточной модели кинетики реактора, что дляборок небольшого размера ($\sim 4-6$ длин миграции) считается вполне приемлемым. Следует иметь в виду, что при таких измерениях для правильного определения реактивности необходимо учитывать возможные погрешности, связанные с "пространственным эффектом" и обусловленные перераспределением поля нейтронов по пространству в присутствии источника нейтронов в сборке и в его отсутствии. При фиксированных положениях источника и датчика нейтронов эффективность регистрации нейтронов датчиком при двух положениях источника может отличаться. Степень этого отличия зависит от выбора местоположения датчика и источника.

Подкритичность сборки в процессе разогрева измерялась при I0-I2 температурах в диапазоне $20-240^{\circ}\text{C}$. Экспериментальные значения $\rho(T)$ обрабатывались с помощью МК по формуле:

$$\rho(T) = a + bT + cT^2.$$

Величина ТЭР определялась как разность значений $\rho(T)$, при 20°C и текущей температуре.

$$\Delta\rho(T) = \rho(T) - \rho(20^{\circ}\text{C}),$$

Оцененная статистическая погрешность зависимости $\rho(T)$ не превышает $\pm 1\%$.

МЕТОДИКА РАСЧЁТА.

В нейтронно-физических расчётах исследуемых уран-водных критическихборок использовали простые оперативные эффективные инженерные методики, не требующие больших затрат машинного времени и в то же время обеспечивающие удовлетворительную точность в определении изучаемых эффектов. Основные расчёты температурных эффектов реактивности были выполнены с использованием двухгрупповой мето-

дики, основанной на решении уравнений реактора в диффузионном приближении. Усреднение эффективных групповых макроконстант для активной зоны и отражателей проводили по многогрупповым спектрам, рассчитанным в различных приближениях, с применением более высоких приближений в области тепловых энергий, где в основном происходит генерация нейтронов в исследуемом типе сборок. Граница раздела групп принята равной 0,67 Эв.

Макроскопические константы тепловой группы нейтронов определены с учётом гетерогенной структуры активной зоны путем усреднения по пространственно-энергетическому распределению плотности потока нейтронов, рассчитанному в смоделированных по составу активной зоны ячейках Вигнера-Зейтца в многогрупповом $\mathcal{D}S_n$ -приближении с учётом эффектов термализации нейтронов / 3 /. Из предварительных расчётов вариаций угловой сетки $\mathcal{D}S_n$ -приближения было определено, для рассматриваемой серии расчётов, $\mathcal{D}S_6$ -приближение. Для отражателей константы тепловой группы нейтронов получены путем усреднения по пространственно-энергетическому распределению плотности потока нейтронов с учётом влияния спектра утечки из активной зоны, рассчитанному в многогрупповом P_1 -приближении метода сферических гармоник с учётом эффектов термализации нейтронов / 4 /. Макроскопические константы надтепловой группы нейтронов определены путем усреднения по девятигрупповому спектру замедления, рассчитанному в диффузионном приближении в гомогенном "голом" реакторе с эквивалентными размерами с источниками, распределенными по спектру деления - для активной зоны, и в бесконечной среде с источниками, распределенными по спектру утечки из активной зоны - для отражателя.

Малогрупповая методика расчёта реактора в диффузионном приближении положена в основу алгоритма программ FACTOR-3 / 3 /, ДШЕСТР / 6 / и RFI-80 / 7 /, используемых в расчётах температурной зависимости эффективного коэффициента размножения нейтронов исследуемых сборок.

Программам FACTOR-3 и ДШЕСТР расчёта реакторов в $(2, Z)$ -геометрии были использованы в расчётах критических сборок с равномерно размещёнными по сечению активной зоны поглощающими стержнями с учётом гетерогенности, вносимой стержнями, при подготовке групповых констант физических зон сборки.

Программу RFI-80 расчёта реактора в (r, φ) -геометрии использовали в расчётах сборок с системой произвольно расположенных цилиндрических поглощающих стержней с учётом гетерогенного расположения стержней путем задания (r, φ) -координат, размера стержней и групповых эффективных граничных условий на поверхности стержня.

Для оценки "пространственных эффектов", т.е. погрешностей, обусловленных перераспределением поля нейтронов по пространству при использовании в реактиметре метода обращенного решения уравнения точечной кинетики, использовалась программа ДНЕСТР / 6 /. Для указанной оценки в программе производится численное моделирование нестационарного распределения поля нейтронов после "выстреливания" источника из реактора. Полученные значения потока нейтронов усредняются с заданной чувствительностью детектора и обрабатываются по тому же алгоритму, что и в реактиметре. Учёт погрешностей возможен двумя путями :

1) введением "показателя неадекватности"

$$\gamma(t) = (P/\beta_{eff}) / (P/\beta_{eff})_{орук}(t),$$

2) с помощью нормированной эффективности детектора (НЭД)

$$\delta(t) = \frac{N(t)}{N(0)} \cdot \frac{[\chi\psi^*, Q\psi(0)]}{[\chi\psi^*, Q\psi(t)]}$$

В расчётах описываемых сборок НЭД практически не изменяется при $t > 0$ и весьма мало отличается от $\gamma(t)$ - в пределах 2% при $t \sim 300$ с. Таким образом, можно использовать приближение мгновенного скачка эффективности и вносить поправки в измеренные значения реактивности любым из указанных путей.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ.

Поведение Кэф уран-водных сборок при их нагреве, как правило, регламентируется совместным действием нескольких эффектов противоположного знака, например, увеличением эффективности водяного отражателя и увеличением эффективности поглощающих стержней. При малых ($\sim 4 - 6$ длин миграции) размерах активной зоны в условиях большого ($\sim 10\%$ в величине Кэф) положительного вклада водяного отражателя влияние количества поглощающих стержней и их

местоположения в активной зоне на такие параметры сборок, как температурный эффект реактивности (ТЭР) и эффективность поглощающих стержней может проявиться наиболее рельефно, так как комбинированное действие выше названных эффектов будет проявляться в условиях разного вклада в Кэф.

В таблицах Ia и Ib представлены результаты таких расчётно-экспериментальных исследований в двух вариантах сборок, отличающихся размерами и формой боковой поверхности при слабом отличии $\rho_{\text{н}} / \rho_{\text{г}}$ в этих сборках. Исследованы три варианта размещения гадoliniевых СВП: в центральной области активной зоны, равномерно по её сечению и на её периферии. В 7 кассетной сборке с эквивалентным радиусом 18,1 см варьировалось местоположение одиночного СВП в каждой из 6 периферийных кассет при неизменном размещении СВП в центральной кассете. В сборке с R экв. = 20,9 см, по форме боковой поверхности наиболее приближающейся к эквивалентному цилиндру, варьировалось размещение 18 СВП. В таблицах Ia и Ib приведены экспериментальные значения $\rho(T)$ и $\Delta\rho(T)$, поправленные на "пространственный эффект" (ПЭ). Использованы значения поправок в центральной плоскости сборки, полученные расчётом по программе ДНЕСТР. Расчётные исследования показали, что величина поправок слабо зависит от расстояния между детектором и границей активной зоны при размещении детектора в отражателе, а источник нейтронов - в центре активной зоны. Соответствующие значения δ для $t = 300$ с меньше δ приблизительно на 1% и растут при увеличении радиуса активной зоны.

В частности, расчёты показали, что величина δ с увеличением степени подкритики увеличивается по закону, близкому к линейному, и скорость её роста составляет $\sim 0,5\%$ в сборке с R экв. = 18,1 см и $\sim 0,9\%$ в сборке с R экв. = 20,9 см на 1 β эф реактивности.

На рис. 2 приведена зависимость отношения ТЭР отравленных сборок к ТЭР невозмущенной сборки радиусом 18,1 см от радиуса размещения одиночного СВП в 6 периферийных кассетах. Во всех исследованных сборках наблюдается монотонное увеличение величины отрицательного ТЭР с температурой.

Таблица Ia

Влияние способа размещения гадолиниевых СВН в двух вариантах уран-водных сборок на степень подкритичности сборок при $T=20^{\circ}\text{C}$ и 240°C . Данные расчёта получены по программе RFI-80. В экспериментальные значения введена поправка на "пространственный эффект".

Радиус сборки, см	Способ размещения СВН, рис. I	Реактивность сборки в β эф			
		$T = 20^{\circ}\text{C}$		$T = 240^{\circ}\text{C}$	
		экспер.	расчёт	экспер.	расчёт
18,1	СВН нет рис.1.1	- 1,63	- 0,25	- 10,84	- 8,78
	7 СВН рис.1.2	- 8,10	- 6,55	- 17,50	- 15,10
	7 СВН рис.1.3	- 5,30	- 5,06	- 14,82	- 14,19
	7 СВН рис.1.4	- 4,50	- 4,16	- 14,70	- 13,93
20,9	СВН нет рис.2.1	0	+ 0,90	- 8,02	- 7,20
	18 СВН рис. 2.2.	- 11,48	- 13,00	- 21,49	- 21,13
	18 СВН рис.2.3	- 8,99	- 10,00	- 20,00	- 19,40
	18 СВН рис.2.4	- 4,54	- 5,30	- 15,70	- 15,69
	8 СВН рис.2.5	- 4,59	- 5,50	- 13,42	- 13,70

Таблица 16

Влияние способа размещения габолиновых СВИ на их эффективность и на величину ТЭР при $T=240^{\circ}\text{C}$ в двух вариантах уран-водных сборок. Данные расчёта получены по программе РР180.

Радиус сборки, см	Способ размещения СВИ, рис. 1	Эффективность СВИ в β эф				ТЭР при $T=240^{\circ}\text{C}$ в β эф	
		$T = 20^{\circ}\text{C}$		$T = 240^{\circ}\text{C}$		эксперим.	расчёт
		эксп.	расчёт	эксп.	расчёт		
18,1	СВИ нет	-	-	-	-	-9,21	-8,53
	рис. 1.1	-	-	-	-	-	-
	7 СВИ	-	-	-	-	-	-
	рис. 1.2	-6,49	-6,30	-6,66	-6,32	-9,40	-8,55
	7 СВИ	-3,67	-4,81	-3,98	-5,41	-9,52	-9,13
20,9	рис. 1.3	-2,87	-3,91	-3,86	-5,15	-10,20	-9,77
	7 СВИ	-	-	-	-	-	-
	рис. 1.4	-	-	-	-	-	-
	СВИ нет	-11,48	-13,90	-13,47	-13,93	-10,01	-8,13
	рис. 2.1	-8,99	-10,90	-11,98	-12,20	-11,01	-9,40
20,9	18 СВИ	-4,54	-6,20	-7,69	-8,49	-11,17	-10,39
	рис. 2.2	-4,59	-6,40	-5,40	-6,50	-8,83	-8,20
	18 СВИ	-	-	-	-	-	-
	рис. 2.3	-	-	-	-	-	-
	18 СВИ	-	-	-	-	-	-
20,9	рис. 2.4	-	-	-	-	-	-
	8 СВИ	-	-	-	-	-	-
	рис. 2.5	-	-	-	-	-	-
	18 СВИ	-	-	-	-	-	-
	рис. 2.5	-	-	-	-	-	-

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ И ВЫВОДЫ.

1. В исследованных сборках отчётливо прослеживается влияние способа размещения гадолиниевых СВП в активной зоне на величину ТЭР отравленныхборок. Наибольшее значение ТЭР наблюдается в сборках, где СВП стоит ближе к границе активной зоны и отражателя, хотя при этом эффективность СВП имеет минимальное значение. Полученные данные при этом показывают, что :

- температурная зависимость эффективности СВП увеличивается по мере их удаления от центра активной зоны ;
- характер изменения ТЭР соответствует характеру изменения температурной зависимости эффективности СВП.

2. Наблюдаемые тенденции в закономерности поведения ТЭР, в целом, одинаковым образом выявляются как в эксперименте, так и в расчёте. Однако, при детальном сравнении значений, рассчитанных по программе *RFI-80*, и экспериментальных величин эффективности СВП, как демонстрируют данные таблиц Ia и Ib, проявляются следующие особенности :

- расчёт завышает эффективность СВП ;
- расчёт показывает меньшую степень изменения эффективности СВП при их перемещении от центра к периферии активной зоны ;
- расчёт показывает меньшую температурную зависимость эффективности СВП.

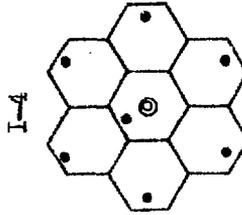
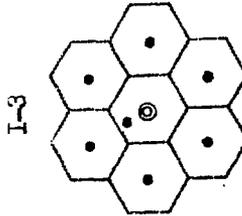
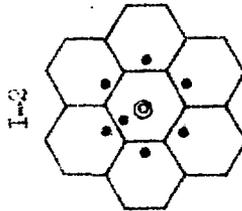
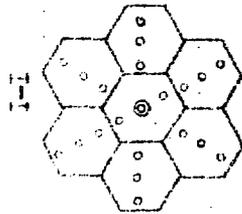
Это обстоятельство даёт возможность сказать, что расчётные значения ТЭР получены в условиях неадекватности учёта влияния гадолиниевых СВП на формирование Каф.

Для количественной иллюстрации эффекта гетерогенности при размещении гадолиниевых СВП в активной зоне были также проведены гомогенизированные расчёты по программе *FACTOR-3*, которая раньше широко использовалась в расчётных исследованиях. Как видно из рис.2, гомогенный расчёт по программе *FACTOR-3*, не учитывающий реального положения СВП, даёт завышенное значение ТЭР.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ .

1. Бондаренко В.В. и др. Контроль реактивности глубоко подкритических реакторов с помощью аналогового реактиметра и корректировка аналога источника. -Атомная энергия, 1976, т. 41, вып.4, с.238.
2. Физико-энергетический институт. Проспект, 1974, с.11.
3. Калашников А.Г., Глебов А.П. Применение \mathcal{D}_S -метода для расчёта ячеек ядерных реакторов в области тепловых энергий нейтронов. Препринт ФЭИ-857, 1978.
4. Кузнецов В.А. и др. Спектры нейтронов в неоднородных средах. Препринт ФЭИ-324, 1972.
5. Булеев Н.И., Гинкин В.П. Алгоритм решения двумерного уравнения реактора в двухгрупповом диффузионном приближении. Препринт ФЭИ-737, 1977.
6. Колесов В.Е., Макаров О.И., Матвеев И.П., Шкодько А.Г. Программа ДНЕСТР и её применение для учёта пространственных эффектов при измерении реактивности методом ОРУК. Препринт ФЭИ-1162, 1981.
7. Земсков Е.А., Исакова Л.Я. Интегральный метод решения стационарной системы групповых уравнений диффузии нейтронов в многозонном реакторе с системой поглощающих стержней в (z, φ) -геометрии. Препринт ФЭИ-436, 1973.

I тип сборки, R экв = 18,1 см



0 - имитатор СВИ

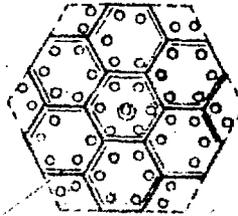
● - гадолиниевый СВИ

⊙ - центральный канал

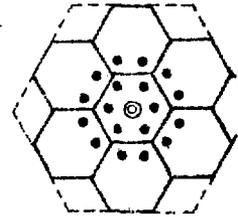
II

ПЛАСТИНА ИЗ
НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ

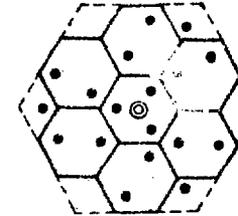
2-1



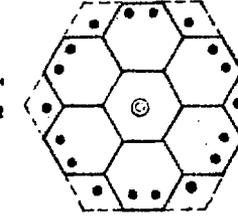
2-2



2-3



2-4



2-5

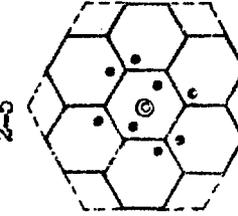


Рис. 1. Картограммы размещения гадолиниевых СВИ, их имитаторов и пластин из нержавеющей стали в двух вариантах сборки.

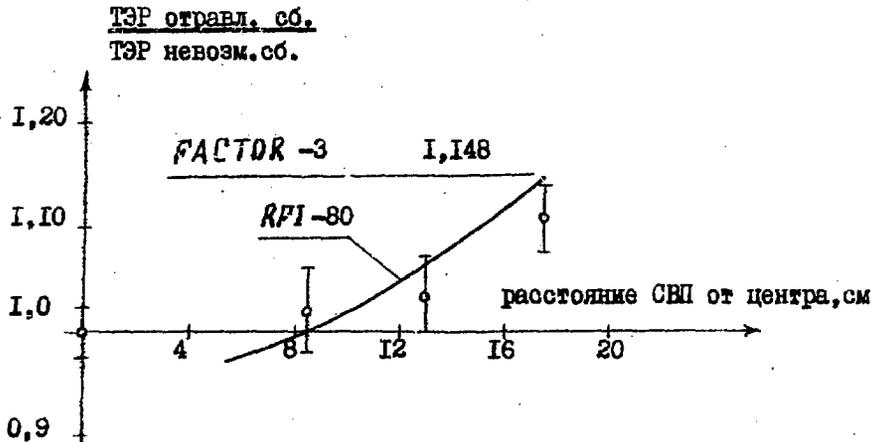


Рис. 2. Зависимость отношения ТЭР отравленных гадолиниевыми СВН сборок к ТЭР невозмущенной сборки радиуса 18,1 см от радиуса расположения одиночного СВН в 6 периферийных кассетах.

Сплошные линии - расчёт по программам *RFI-80* и *FACTOR-3*.

4192-86-95

Технический редактор **Н. П. Герасимова**

Подписано к печати 25.09.1986 г.	T-21122	Бумага № 1	
Формат 60×90 ^{1/16}	Усл. п. л. 0,75	Уч.-изд. л. 0,5	Тираж 95 экз.
Цена 8 коп.	Индекс 3624	ФЭИ-1795	

Отпечатано на ротапринтере.
249020, г. Обнинск Калужской обл., ФЭИ

**Влияние гетерогенности размещения поглощающих стержней в активной зоне на формирование температурного эффекта реактивности уран-водных сборок.
ФЭИ-1795, 1986, 1-12.**