

ИНТЕГРАЛЬНЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ НА КРИТИЧЕСКИХ СБОРКАХ И РЕАКТОРАХ В ОБОСНОВАНИЕ УРАН-ТОРИЕВОГО ЦИКЛА*

В.И.Голубев, А.В. Звонарев, Г.Н.Мантуров, Ю.С.Хомяков, А.М.Цибуля

ГНЦ РФ - Физико-энергетический институт им. А.И. Лейпунского, г. Обнинск



На шести критических сборках КБР (№№18÷23) были исследованы уран - ториевые композиции с различным содержанием замедлителя. Сборки КБР-18÷21 были построены по единому принципу - центральная подкритическая зона в форме равновеликого цилиндра, собранная из блоков оксида обогащенного урана и металлического тория и окруженная запальной зоной из обогащенного урана. Материальный состав центральных зон выбирался таким образом, чтобы коэффициент размножения K_{∞} композиций центральных зон был близок к единице. Отношение концентраций ядер добавленного в зону водорода в виде тонких полиэтиленовых (CH_2) фольг и ^{235}U варьировалось от 0 до ~70. При этом обогащение топлива менялось от 10 до 2.5%. Сборки КБР-22 и 23 представляли собой реальные критические системы с уран-ториевыми активными зонами. В экспериментах определялись критичность систем, величина K_{∞} композиции центральных зон, которая находилась из значений реактивностей элементарных ячеек и топливной компоненты ячеек. Кроме того, в центральной области исследованных зон измерены отношения сечений захвата и деления ^{232}Th и ^{238}U к сечению деления ^{235}U . С помощью твердотельных детекторов измерялись относительные сечения деления ряда трансурановых нуклидов. На реакторе БН-350 проведены эксперименты по облучению образцов тория с целью определения интенсивности накопления ^{233}U и содержания ^{232}U . Помимо этого, в разных зонах реактора измерялись относительные сечения деления, захвата и ($n, 2n$) для ^{232}Th , ^{233}U и ^{231}Pa .

В рамках программы исследования возможности использования ториевого цикла в быстрых реакторах был выполнен ряд экспериментов на критических сборках и на реакторе БН-350. Экспериментальная программа включала изучение характеристик уран-ториевых композиций на критических сборках КБР (стенд КОБРА) и исследование изменения нуклидного состава в ториевых образцах, облученных в активной зоне и в отражателе реактора БН-350.

Стенд КОБРА представляет собой набор вертикально расположенных стальных труб (диаметр 5.0 см, толщина стенки 0.1 см и длина около 160 см), закрепленных на толстой стальной опорной плите и заполненных блоками различных материалов. Все исследованные сборки сконструированы в форме квазичилиндрических центральных ("test") зон, диаметром и высотой около 50 см, составленных из

© В.И.Голубев, А.В. Звонарев, Г.Н.Мантуров, Ю.С.Хомяков, А.М.Цибуля, 1999

* Доклад с российско-индийского семинара по ториевому топливному циклу (Обнинск, 17-19 ноября 1998 г.)

блочков окиси обогащенного урана (толщиной 0.173 см) и блочков металлического тория толщиной 1.0 см. В процессе экспериментов исследованы четыре сборки. Центральная зона первой из этих сборок (КБР-18) состояла только из блочков урана и тория. В центральные зоны других сборок (КБР-19÷21) было добавлено различное количество замедлителя - водорода в виде тонких фольг полиэтилена (CH₂). Состав элементарных ячеек центральных зон всех сборок выбирался таким, чтобы величина K_∞ этих композиций была близка к единице. При этом условия центральные зоны являются подкритическими и для обеспечения критичности сборки вокруг центральных зон размещена так называемая запальная зона (driver), содержащая обогащенный металлический уран и отражатель из окиси обед-

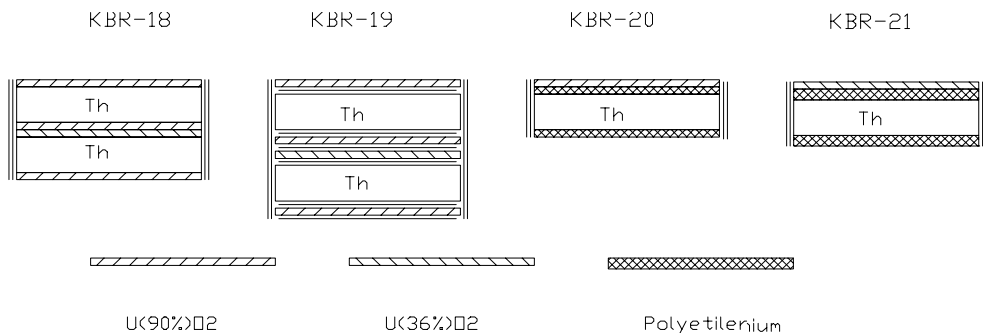


Рис.1. Композиция элементарных ячеек центральных зон критических сборок КБР-18÷21

ненного урана. Конструкция элементарных ячеек центральных зон всех сборок показана на рис.1. Основные характеристики центральных зон приведены в табл.1.

Основной измеряемой величиной в экспериментах на сборках КБР-18÷21 был функционал K⁺, определяемый как

$$K^+ = \int (\varphi^+ P \varphi) dE / \int (\varphi^+ A \varphi) dE.$$

Здесь P и A - операторы рождения и поглощения нейтронов на спектре потока и ценности в центральной ячейке исследуемой зоны. Если размеры центральной

Таблица 1
Параметры центральных уран-ториевых зон сборок КБР-18÷21

Сборка	КБР-18	КБР-19	КБР-20	КБР-21
Радиус центр. зоны, см	25.6	25.4	24.8	25.0
Высота центр.зоны, см	48.5	50.0	56.5	56.1
Ядерные концентрации элементов (относит.)				
²³⁵ U	1.00	1.00	1.00	1.00
²³⁸ U	0.30	0.30	0.11	1.75
O	2.60	2.60	2.21	5.51
²³² Th	8.66	8.66	14.72	36.76
H	-	1.10	9.90	73.65
C	-	0.55	4.95	36.83
Нерж. сталь X18H10	6.0	6.3	8.4	24.7
Доля нейтронов в спектре ниже 10 kev (расч.)	0.8%	9.5%	26%	37%

Таблица 2

Размножающие характеристики центральных уран-ториевых зон сборок КБР-18÷21

Сборка	КБР-18	КБР-19	КБР-20	КБР-21
K^+_{exp}	0.970 (4)	0.980 (4)	1.017 (5)	0.929 (5)
K_{∞}/K^+_{calc}	1.004	1.002	1.000	0.997
$K_{\infty\text{ het}}/K_{\infty\text{ hom}}$	1.002	1.016	1.036	1.054
K^+_{exp}/K^+_{calc}	0.99	1.00	1.02	0.98

зоны достаточно велики, т. ч. влияние запальной зоны на формирование нейтронного спектра в центре сборки незначительно, то функционал K^+ близок к величине K_{∞} этой композиции.

Функционал K^+ связан с непосредственно измеряемыми в эксперименте величинами - эффектами реактивности элементарной ячейки и реактивности топливной составляющей этой ячейки (ρ_{cell} и ρ_{fuel}) соотношением

$$K^+ = 1/\{1 - (\rho_{cell}/\rho_{fuel}) \times f\},$$

где f - расчетный параметр, погрешность оценки которого несущественна, если отношение ρ_{cell}/ρ_{fuel} близко к нулю, т.е. $K^+ \approx 1$.

Измерения реактивностей ячеек и блоков обогащенного урана выполнялось с помощью реакторного осциллятора с пневматическим приводом. Экспериментальные и расчетные параметры исследованных центральных зон сборок КБР-18÷21 показаны в табл.2.

Расчет коэффициентов размножения и оценка гетерогенных эффектов были выполнены по программам КРАБ и FFCR с константами из библиотеки БНАБ-78.

В центре рассматриваемых критических сборок были проведены также измерения отношений средних сечений деления и захвата ^{232}Th и ^{238}U к сечению деления ^{235}U методом активационных детекторов. В сборках КБР-18 и 19 активационные фольги размещались в полости, образованной после извлечения элементарной ячейки, так что результат измерений можно рассматривать как усредненный по спектру в центре сборки. В сборках КБР-20 и 21, в центральных зонах которых содержится сравнительно большое количество замедлителя, активационные фольги размещались между отдельными блоками ячейки, а также внутри разрезанного ториевого блока. Таким образом было получено распределение скоростей реакций по высоте элементарной ячейки. Результаты измерений показаны в табл.3. Отметим, что данные для сборок КБР-20 и 21 усреднены только по толщине ториевого блока. Числа в скобках означают экспериментальные погрешности в последних десятичных позициях.

Таблица 3

Экспериментальные значения относительных сечений захвата и деления ^{232}Th и ^{238}U

Сборки	КБР-18	КБР-19	КБР-20	КБР-21
$\sigma_c(\text{Th})/\sigma_f(^{235}\text{U})$	0.154 (7)	0.20 (1)	0.060 (3)	0.023 (1)
$\sigma_c(^{238}\text{U})/\sigma_f(^{235}\text{U})$	0.127(5)	0.28(1)	0.47(2)	-
$\sigma_f(\text{Th})/\sigma_f(^{235}\text{U})$	0.0066(3)	0.0061(2)	0.0030(1)	0.00080(4)
$\sigma_f(^{238}\text{U})/\sigma_f(^{235}\text{U})$	0.0262(5)	0.0251(7)	0.0103(4)	0.0027(1)

Помимо упомянутых выше сборок с центральными подкритическими исследуемыми зонами на стенде КОБРА были рассмотрены две критические сборки - КБР-22 и 23 с уран-ториевыми активными зонами. Элементарные ячейки этих активных зон состояли из блоков металлического обогащенного (90%) урана толщиной 0.56 см и блоков металлического тория. Кроме того, в активную зону сборки КБР-23 был добавлен замедлитель - блоки полиэтилена толщиной 0.5 см. Структура элементарных ячеек этих сборок показана на рис.2.

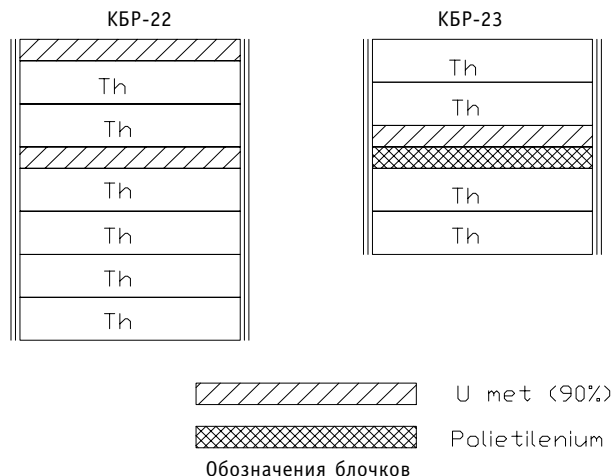


Рис.2. Композиция элементарных ячеек активных зон критических сборок КБР-22 и КБР-23

Кроме того, в активную зону сборки КБР-23 был добавлен замедлитель - блоки полиэтилена толщиной 0.5 см. Структура элементарных ячеек этих сборок показана на рис.2.

Основной целью этих экспериментов было сопоставление измеренных критических параметров ($K_{эфф}$) для систем с различной "жесткостью" нейтронного спектра с соответствующими расчетными данными. В табл.4 приведены основные характеристики активных зон сборок КБР-22 и 23.

В центре активных зон сборок КБР-22 и 23 активационным методом были измерены

отношения сечений захвата ^{232}Th , ^{238}U и ^{237}Np к сечению деления ^{235}U . В сборке КБР-22, активная зона которой не содержит водорода, величина этих функциона-

Таблица 4

Характеристики критических сборок с уран-ториевыми активными зонами

Сборки	КБР-22	КБР-23
Ядерные концентрации (относительные)		
^{235}U	1.00	1.00
^{238}U	0.12	0.12
^{232}Th	3.98	5.30
H	-	1.94
C	-	0.97
Нерж. сталь X18H10	1.5	2.1
Радиус активной зоны (критический), см	42.03	40.03
Высота активной зоны, см	61.0	81.3
Толщина отражат.(UdepI O_2)		
Верхний и нижний, см	45	34
Радиальный, см	40	40
Критич. загрузка ^{235}U , кг	524.0	475.3
Доля нейтронного спектра ниже 10 keV, (расч), %	0.4	13

Таблица 5

Сравнение измеренных и рассчитанных относительных сечений реакций в различных зонах реактора БН-350

Ячейка	ЗМО(93)	БЗВ(262)	ВБЭ(118)
Реакция	Р/Э	Р/Э	Р/Э
$^{231}\text{Pa}(n,\gamma)$	1.57	1.47	1.58
$^{232}\text{Th}(n,\gamma)$	1.03	1.00	1.03
$^{232}\text{Th}(n,f)$	0.96	-	0.96
$^{232}\text{Th}(n,2n+\gamma,n)$	0.94	-	-
$^{233}\text{U}(n,f)$	1.00	-	0.98

лов практически не зависит от места расположения активационных детекторов. В случае же КБР-23, например, относительное сечение захвата тория в районе полиэтиленового блока почти в два раза превышает сечение внутри ториевого блока.

В центре всех рассмотренных выше сборок методом трековых детекторов были измерены относительные сечения деления ряда трансурановых нуклидов. В настоящее время проводится расчетный анализ всех исследованных уран-ториевых сборок с использованием различных расчетных программ и систем ядерных констант. Результаты такого анализа могут оказаться полезными для проверки расчетных методик, уточнения сечений тория, а также для составления benchmark моделей.

На реакторе БН-350 выполнено несколько серий измерений, связанных с проблемами ториевого цикла. В частности, определялись отношения сечений реакций на ^{232}Th , ^{231}Pa и ^{233}U к сечению деления ^{235}U в различных зонах реактора: в зоне малого обогащения (ЗМО), в боковой зоне воспроизводства (ВБЗ) и в экспериментальной сборке из обедненного металлического урана (ВЗВ) внутри зоны малого обогащения. Образцы в виде оксидов или металлической проволоки диаметром 0.8 мм помещались в капсулы из нержавеющей стали размером 1.6×0.16 мм. Облучение образцов осуществлялось в межтвельном пространстве ТВС при мощности реактора 5 МВт в течение 3 ч. Положение образцов в ТВС определялось с помощью пеленгации специально загруженного источника ^{192}Ir .

Результаты эксперимента сравнивались с данными расчета, выполненного по программе TRIGEX, что показано в табл.5.

Как видно, результаты экспериментов указывают на необходимость существенного снижения, принимавшегося в расчете сечения радиационного захвата нейтронов в ^{231}Pa . Остальные измерявшиеся отношения сечений согласуются с расчетными в пределах экспериментальных погрешностей.

Поступила в редакцию 22.12.98.

The developed fuel cycle with the large-scale utilization of thorium is a long-way outlook for Russia. However the useful features of thorium use in light water and fast reactors can be related in near future. These useful features relate to the safety improvement, less actinide accumulation and the better resistance to non-sanctioned use of fissionable materials.

The article is devoted to the parameters and problems of reactors which can help to start the thorium involvement in nuclear industry.

УДК 621.039.526:621.039.516.4

Integral Experiments on Critical Facilities and Reactors for Basing of Uranium-Thorium Cycle \ V.I.Golubev, A.V.Zvonarev, G.N.Manturov, Yu.S.Khomyakov, A.M.Tsiboulia; Editorial board of journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) - Obninsk, 1999. - 5 pages, 5 tables, 2 illustrations.

The uranium-thorium compositions with different moderator amount were studied on six critical facilities (KBR 18-23). The KBR-18..21 were created as the central subcritical cylindrical core made from enriched uranium oxide and metal thorium surrounded by igniter zone of enriched uranium. The material of central zone was to provide K_f value about 1. The hydrogen was added in the form of thin CH_2 foils and the $\text{H}/^{235}\text{U}$ nuclei ratio was from 0 up to ~ 70 . The fuel enrichment was varied from 10 to 2.5%.

The KBR-22..23 were real critical systems with uranium-thorium core.

The criticality of system and K_f of central zone were measured in the experiments. In addition, ratio of ^{232}Th and ^{238}U capture and fission cross-sections to ^{235}U fission cross-section were measured in the central zone. The relative cross-sections of some transuranium elements were measured.

The experiments were made in the BN-350 reactor for thorium sample irradiation to define the intensity of ^{233}U accumulation and ^{232}U content. In addition the relative fission, capture and $(n,2n)$ cross-sections were measured in different zones of the reactor for ^{232}Th , ^{233}U and ^{231}Pa .

УДК 621.039.526:621.039.516.4.

Investigation of Thorium Irradiated in Lateral Blanket of Fast Reactor and in Thermal Spectrum of Graphite Reactor \ A.V.Zvonarev, B.Ya.Zil'berman, V.I.Ivanov, N.A.Nerozin, V.B.Pavlovich, B.A.Petrukhin, F.P.Raskach, E.Ya.Smetanin, L.V.Sytnik, M.F.Troyanov, Yu.S.Khomyakov, L.A.Chernov, I.G.Sheyner; Editorial board of journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) - Obninsk, 1999. - 5 pages, 2 tables, 2 illustrations.

To find the possibility for ^{232}U accumulation lower than 10 ppm, the IPPE had organized the irradiation of thorium samples in the lateral blanket of the BN-350 fast reactor and in the thermal graphite-water reactor with subsequent radiochemical analysis of irradiated samples. The main results of these works are presented in the article.

УДК 621.039.58

On the Problem of Estimation of Model Uncertainties During Probabilistic Analysis Providing Nuclear Power Plant Unit's Safety \ A.V. Antonov; Editorial board of journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) - Obninsk, 1999. - 6 pages, 1 table, 1 illustration. - References, 6 titles.

The problem of analysis of uncertainties, which are caused by sufficient discrepancies of conceptual and mathematical models as well as by numerical approximation, errors in codes and limitations of calculation process is considered. Methods of the statistic resemblance theory are proposed as a method of analysis. The Fisher criterion is considered which is a particular case of models obtained in the frame of the resemblance theory. A numerical example is given to illustrate the application of proposed method.