

ИСПЫТАНИЯ ОПЫТНЫХ СБОРОК РЕАКТОРА СМ С ПОВЫШЕННОЙ ЗАГРУЗКОЙ УРАНА

**В.А. Старков*, М.Н. Святкин*, А.В. Клинов*, А.П. Малков*,
В.Е. Федосеев*, А.Л. Петелин*, Ю.Б. Чертков****

**ОАО «ГНЦ НИИАР», г. Димитровград*

***Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
г. Томск*



Приводятся результаты расчетов распределений энерговыделения и выгорания по сечению трех опытных топливных сборок (ТВС) с повышенным содержанием урана в твэлах (6 г U^{235}), полученные при расчетном и экспериментальном моделировании условий их работы в активной зоне исследовательского реактора СМ. Анализируется характер изменения этих распределений в процессе облучения. Рассмотрены теплофизические параметры работы твэлов опытных ТВС. Приведены основные контролируемые параметры испытаний. Показано, что ТВС реактора с увеличенной загрузкой топлива успешно выдержали полный цикл реакторных испытаний, сохранив работоспособность при энерговыделении, тепловых нагрузках и глубине выгорания топлива, соответствующих условиям эксплуатации модернизированной активной зоны реактора.

Ключевые слова: ТВС, распределение энерговыделения, продукты деления, выгорание топлива, плотность теплового потока, температура топлива (оболочки).

Key words: fuel assembly (FA), power density distribution, fission products, fuel burnup, heat flow density, fuel (cladding) temperature.

Опыт эксплуатации штатного твэла реактора СМ с сечением крестообразного профиля, оболочкой из нержавеющей стали и дисперсионным сердечником на основе диоксида урана в матрице из меди, содержащим 5 г ^{235}U , подтвердил его высокую надежность при работе с плотностью теплового потока на поверхности твэлов на уровне проектных значений. На первом этапе модернизации активной зоны запланирован переход на использование ТВС с чехлом из сплава 110 вместо чехла из нержавеющей стали и с твэлами, содержание ^{235}U в которых повышено с 5 до 6 г без изменения мощностных режимов работы твэлов и глубины выгорания топлива [1]. Для экспериментального обоснования работоспособности модифицированных ТВС и твэлов с повышенной загрузкой урана в условиях модернизированной активной зоны были проведены ресурсные реакторные испытания трех полномасштабных опытных сборок, твэлы которых по геометрическим характеристикам были полностью аналогичны штатным твэлам реактора СМ.

© В.А. Старков, М.Н. Святкин, А.В. Клинов, А.П. Малков, В.Е. Федосеев, А.Л. Петелин, Ю.Б. Чертков, 2011

Испытания двух опытных ТВС были проведены при средних для реактора СМ тепловых нагрузках (8–10 МВт/м²):

- ТВС № 1 по конструкции является аналогом (с заменой стального чехла на циркониевый) штатной ТВС и содержит 160 твэлов и четыре ампульных канала $\varnothing 12,5$ мм;
- ТВС № 2 является новой разработкой, имеет чехол из циркониевого сплава, содержит 158 твэлов и ампульный канал $\varnothing 24,5$ мм.

После успешных испытаний этих сборок в активную зону реактора была установлена полномасштабная опытная ТВС № 3, которая по конструкции является аналогом штатной ТВС, содержащей 188 твэлов и циркониевый чехол, для проверки работоспособности при максимальной тепловой нагрузке (до 15 МВт/м²).

Для обоснования режимов испытаний были проведены предтестовые расчетные исследования нейтронно-физических и теплогидравлических характеристик активной зоны и режимов облучения ТВС. Параллельно с испытаниями опытных ТВС проводилось их расчетное сопровождение.

Цель работы заключалась в том, чтобы показать, что в процессе испытаний опытных ТВС обеспечивались типичные для штатных ТВС реактора режимы работы, а достигнутые при этом значения выгорания топлива соответствуют или превышают значения выгорания в выгружаемых штатных сборках. Таким образом, на основании анализа условий испытаний и полученных результатов необходимо было подтвердить работоспособность новых ТВС в условиях модернизированной активной зоны.

РАСЧЕТНАЯ МОДЕЛЬ И МЕТОДИКИ ПРОВЕДЕНИЯ РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ОБОСНОВАНИЯ РЕЖИМОВ ИСПЫТАНИЙ

Моделирование нейтронно-физических условий облучения проведено с использованием кода MCU-RR [2]. MCU-RR – трехмерная аттестованная программа нейтронно-физического расчета ядерных реакторов, в которой реализован аналоговый метод Монте-Карло совместного моделирования траекторий нейтронов и гамма-квантов в трехмерной геометрии. Константное обеспечение программы MCU-RR базируется на библиотеке ядерных данных DLC/MCUDAT-2.1. С использованием этой программы была разработана трехмерная математическая модель для изучения нейтроники реактора, позволяющая детально описать конструкцию и материальный состав элементов активной зоны [3]. С помощью данной модели определялись потвзльное распределение энерговыделения и выгорания топлива по сечению тепловыделяющих сборок в процессе облучения, коэффициенты неравномерности энерговыделения по сечению ТВС и реактора, максимальные значения плотности тепловых потоков с поверхности твэлов.

Выполнено расчетное моделирование 26-ти кампаний реактора, рассчитаны распределения энерговыделения и изменение изотопного состава в процессе выгорания топлива. При расчетах распределения энерговыделения на каждом шаге разыгрывалось по 12 миллионов историй нейтронов. При этом статистическая погрешность определения энерговыделения в твэлах экспериментальных ТВС составила менее 2%, а выгорания топлива ~0,5 %.

При моделировании теплогидравлических режимов облучения использовались методики [4, 5] и программа [6], реализующая решение уравнения теплопроводности методом конечных элементов и позволяющая проводить расчет температурного поля в твэлах со сложным профилем поперечного сечения. Методики [4, 5] тестировали по результатам внутриреакторных экспериментов с моделированием кризиса теплоотдачи [7].

Предтестовое обоснование компоновки активной зоны и режимов облучения опытных ТВС

На рисунке 1 приведена картограмма реактора СМ. Испытания ЭТВС № 1 и № 2 при средних нагрузках проводились в ячейках 52 и 76 соответственно, ЭТВС № 3 – в ячейке 83.

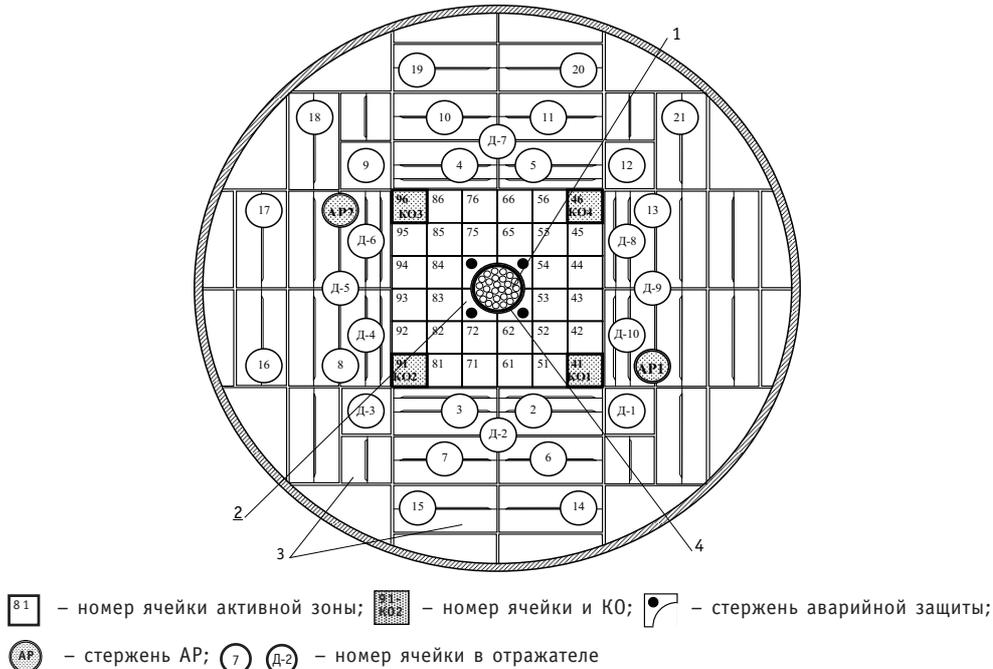


Рис. 1. Картограмма активной зоны и отражателя реактора СМ: 1- центральный блок с облучательными каналами; 2 – бериллиевый вкладыш; 3 – бериллиевый блок отражателя; 4 – центральный компенсирующий орган

Предварительный выбор компоновки активной зоны для испытаний опытных ТВС проводился исходя из условий обеспечения заданной плотности потока тепла на поверхности твэлов и необходимого запаса до кризиса теплообмена. При этом нейтронно-физические расчеты проводились с использованием комплекса [2, 3] при фиксированном положении органов регулирования: ЦКО – 0 мм, КО – 280 мм. При таком положении органов СУЗ достигается наибольшая неравномерность распределения энерговыделения по активной зоне реактора [8].

На рисунке 2 приведены схема компоновки активной зоны, выбранная для испытаний ЭТВС № 1 и № 2, и результаты расчетов.

На рисунке 3 приведена компоновка активной зоны реактора к началу испытаний ЭТВС №3.

Результаты расчета условий испытаний ЭТВС №3 при мощности реактора 90 МВт приведены на рис. 4.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТНОГО СОПРОВОЖДЕНИЯ ОБЛУЧЕНИЯ ОПЫТНЫХ ТВС

На рисунке 5 приведены зависимости мощности опытных ТВС от времени облучения.

Мощность опытных ТВС имеет максимальное значение в начале облучения при положении регуляторов КО, наиболее близком к 280 мм. Темп уменьшения мощ-

14,00	19,76	0,00	4,51	26,54	13,61	0,34	0,81	1,01	1,01	0,76	0,31
4,03	31,48	12,18	24,21	16,14	16,52	0,93	0,68	1,32	1,23	0,89	0,78
0,00	18,99	ЦЗБ		19,43	0,00	1,26	1,32	ЦЗБ		1,25	0,87
27,19	28,87	ЦЗБ		12,78	4,85	1,12	1,33	ЦЗБ		1,34	1,11
8,20	20,15	6,05	24,01	0,00	12,88	1,07	1,14	1,64	1,32	1,09	0,86
14,02	0,00	14,05	26,75	26,52	13,55	0,41	1,11	1,35	1,14	0,87	0,35

а) б)

2,06	1,99	1,91	1,68	2,03	2,12	2,23	5,16	7,30	5,41	4,97	2,11
2,16	1,75	2,23	2,09	1,56	1,84	6,44	4,49	9,46	8,26	4,43	4,64
1,87	2,10	ЦЗБ		2,25	1,94	7,57	8,93	ЦЗБ		9,00	6,36
1,67	2,01	ЦЗБ		2,18	1,64	5,99	8,57	ЦЗБ		9,40	5,87
2,02	1,48	2,06	2,25	1,76	2,11	6,93	6,37	10,82	9,52	7,32	5,83
2,17	2,14	1,79	1,79	2,27	2,17	2,86	7,64	7,72	6,57	6,31	2,45

в) г)

Рис. 2 Картограммы загрузки и характеристики распределений энерговыделения по активной зоне реактора СМ. Серым цветом выделены ячейки с ЭТВС №1 (яч. 52) и №2 (яч. 76). Мощность реактора 90 МВт: а) – распределение выгорания топлива по ячейкам активной зоны, %; б) – распределение энерговыделения по ячейкам активной зоны, отн. ед.; в) – коэффициенты неравномерности распределения энерговыделения по сечению ТВС; г) – максимальные значения плотности теплового потока с поверхности твэлов, МВт/м²; ЦЗБ – центральный замедляющий блок

16,2	11,4	0	22,6	3,7	16,7
3,50	17,2	11,3	20,6	22,0	11,6
21,1	31,6	ЦЗБ		31,4	10,2
22,4	0	ЦЗБ		5,5	25,8
8,2	28,0	5,5	21,0	0	19,0
16,1	15,1	24,6	9,3	11,8	16,4

Рис.3. Распределение выгорания топлива по ячейкам активной зоны, %. Серым цветом выделена ячейка № 83 с ЭТВС №3

0,25	0,86	1,18	1,01	0,92	0,23		2,39	1,66	1,74	1,72	2,10	2,61
0,93	1,09	1,43	1,32	1,00	0,84		1,99	1,73	2,41	2,36	1,77	1,96
1,06	1,25	ЦЗП		1,20	1,00		1,84	2,35	ЦЗП		2,43	1,71
1,05	1,69	ЦЗП		1,50	0,98		1,88	2,58	ЦЗП		2,37	1,88
0,94	0,94	1,53	1,36	1,16	0,82		2,02	1,51	2,45	2,39	1,63	1,93
0,25	0,88	1,02	1,13	0,90	0,25		2,58	2,05	1,74	1,74	1,83	2,33

а) б)

1,93	4,65	6,67	5,65	6,26	1,96		3,85	1,95	1,44	1,70	1,45	3,78
6,03	6,10	11,15	10,14	5,78	5,35		1,50	1,83	1,59	1,75	1,94	1,69
6,31	9,56	ЦЗП		9,50	6,57		1,52	1,86	ЦЗП		1,87	1,46
6,45	14,15	ЦЗП		11,52	6,01		1,49	1,25	ЦЗП		1,54	1,60
6,18	5,42	12,19	10,57	7,24	5,14		1,47	2,07	1,46	1,68	1,55	1,76
2,10	5,86	5,75	6,40	5,33	1,87		3,52	1,55	1,67	1,50	1,70	3,96

в) г)

Рис. 4. Условия работы рабочих ТВС и ЭТВС № 3 на начало испытаний: а) – распределение энерговыделения по ячейкам активной зоны, отн. ед.; б) – коэффициенты неравномерности распределения энерговыделения по сечению ТВС; в) – максимальные значения плотности теплового потока с поверхности твэлов, МВт/м²; г) – минимальные коэффициенты запаса до кризиса теплообмена в первом приближении пропорционален мощности сборки в начальный момент облучения.

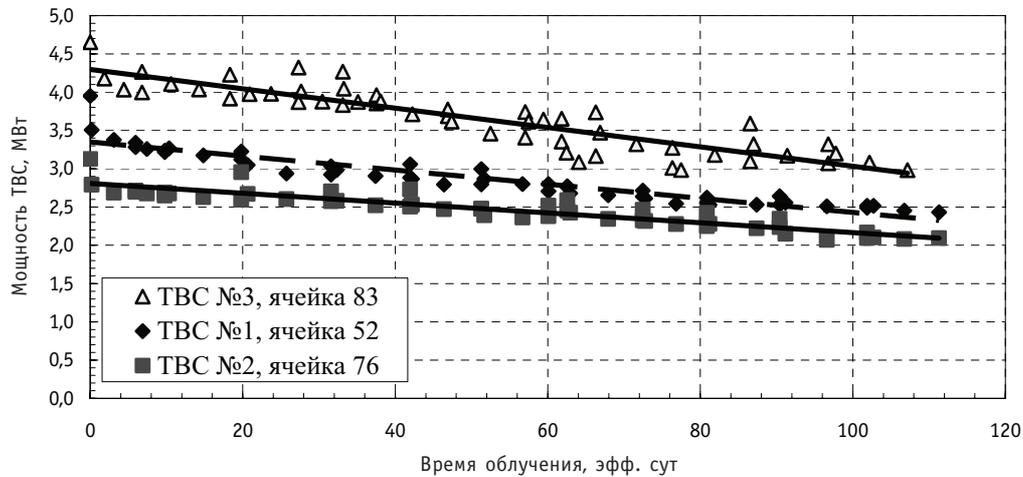


Рис. 5. Зависимость мощности опытных ТВС от времени облучения

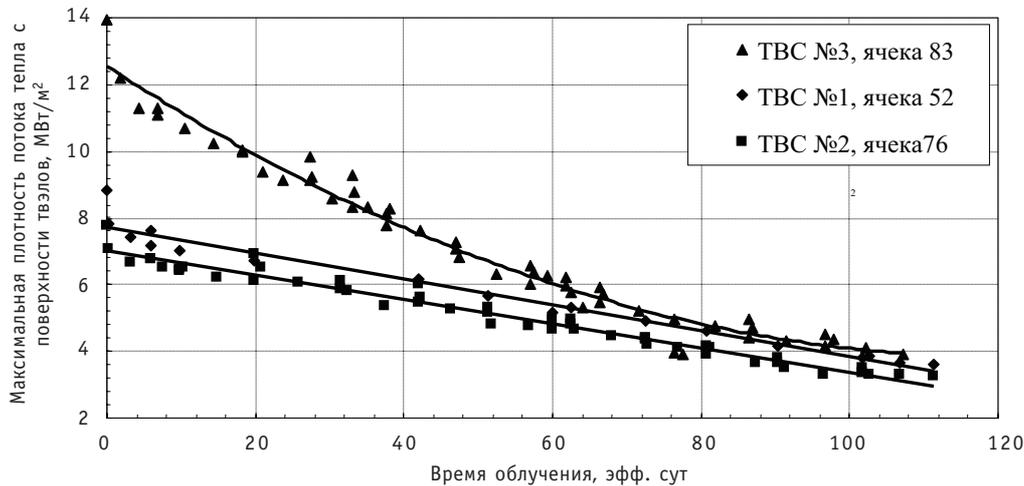


Рис. 6. Зависимости максимальной плотности теплового потока с поверхности твэлов опытных ТВС от времени облучения

На рисунке 6 приведены зависимости максимальной плотности теплового потока с поверхности твэлов опытных ТВС в зависимости от времени облучения.

После облучения сборок в течение 90 эффективных суток максимальные плотности теплового потока с поверхности твэлов практически сравниваются и составляют 3,5–4 МВт/м².

Зависимости среднего выгорания топлива опытных ТВС от времени облучения приведены на рис. 7.

В результате облучения опытных ТВС достигнуты следующие значения выгорания топлива:

ТВС № 1 – среднее выгорание – 42,8 %, максимальное в точке – 63,7 %;

ТВС № 2 – среднее выгорание – 37,3 %, максимальное в точке – 66,6 %.

ТВС № 3 – среднее выгорание – 44,9 %, максимальное в точке – 93,0 %.

Среднее по ТВС значение плотности продуктов деления в сердечнике при этом менялось в диапазоне от 0,68 до 0,82 г/см³, максимальное от 1,18 до 1,72 г/см³.

Среднее выгорание топлива в выгружаемых штатных ТВС составляет 37%, максимальное – 75%. Плотность продуктов деления в сердечнике равна при этом 0,57 и 1,16 г/см³ соответственно.

Параметры работы максимально-напряженного твэла и опытных ТВС

Параметр	ТВС №1 Яч. 52	ТВС №2 Яч. 76	ТВС №3 Яч. 83
Расход теплоносителя через топливную часть ТВС, м ³ /ч	59.4	47.6	112.4
Скорость теплоносителя, м/с	7.1	5.7	11.5
Давление в I контуре, МПа	5.0	5.0	5.0
Температура теплоносителя на входе в ТВС, °С	50.0	50.0	50.0
Температура теплоносителя на полувывоте активной части, °С	96	100.9	96
Максимальная плотность теплового потока, МВт/м ²	8.7	7.8	14,1
Максимальное объемное энерговыделение в сердечнике, Вт/м ³	1.92·10 ¹⁰	1.7·10 ¹⁰	3.05·10 ¹⁰
Коэффициент конвективной теплоотдачи, Вт/(м ² ·°С)	39310	32930	57560
В начале облучения			
Мощность ТВС, МВт	3.94	3.13	4.65
Коэффициент неравномерности распределения энерговыделения: - по сечению ТВС - по высоте активной части	1.60 1.30	1.76 1.30	2.53 1.30
Максимальная температура в центре сердечника, °С	445	427	546
Максимальная температура внутренней поверхности оболочки, °С	400	386	471
Максимальная температура наружной поверхности оболочки, °С	286	286	290
Коэффициент запаса до кризиса теплообмена в точке с максимальной температурой поверхности	1.51	1.50	1.25
В конце облучения			
Мощность ТВС, МВт	2,09	2,43	2,98
Коэффициент неравномерности распределения энерговыделения: - по сечению ТВС - по высоте активной части	1,07 1,05	1,41 1,05	1,08 1,05
Максимальная температура в центре сердечника, °С	206	252	186
Максимальная температура наружной поверхности оболочки, °С	161	200	136

качества теплоносителя, регламентированных действующими нормативными документами, зафиксировано не было.

В процессе работы реактора на мощности производится постоянный поячеечный контроль герметичности ТВС штатной системой КГО по запаздывающим нейтронам путем индивидуального отбора теплоносителя от всех ТВС реактора.

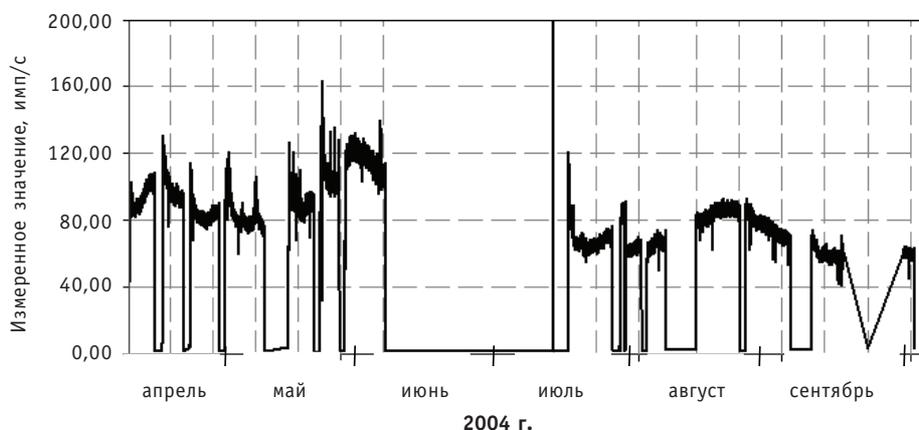


Рис. 9. Изменение активности носителей запаздывающих нейтронов в водяном теплоносителе системы КГО для ячейки 83 (апрель–сентябрь 2004 г.): — — Т-83

На рисунке 9 представлены изменения показаний активности нейтронных излучателей в канале КГО ячейки 83, в которой проводились испытания наиболее напряженной ЭТВС № 3.

Анализ показаний системы КГО реактора СМ показал отсутствие разгерметизаций оболочек твэлов – активность водяного теплоносителя на выходе из опытных ТВС была стабильной, а значения показаний системы КГО в этих каналах не превышали допустимого значения (140 имп/с).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Результаты расчетного и экспериментального исследований условий испытаний экспериментальных ТВС исследовательского реактора СМ с повышенной загрузкой топлива свидетельствуют о том, что компоновка активной зоны штатными ТВС и выбирая позиции для размещения опытных тепловыделяющих сборок с использованием данных прогнозирования можно обеспечить нужные режимы и непревышение пределов безопасности эксплуатации при испытаниях. Показано, что модернизированное топливо способно работать в эксплуатационных условиях вплоть до предельных выгораний и обеспечить надежную работу реактора с активной зоной, допускающей размещение дополнительных экспериментальных объемов с жестким спектром нейтронов по сравнению со штатной.

2. В результате расчетного моделирования нейтронно-физических и теплогидравлических условий работы ЭТВС в процессе сопровождения облучения показано, что

- мощность сборки № 1 (6 г урана-235 в твэле, 160 твэлов, четыре ампульных канала $\varnothing 12,5$ мм) изменялась от 3,9 до 2,4 МВт при минимальном запасе до кризиса теплообмена 1,51; максимальная плотность теплового потока составила $8,7 \text{ МВт/м}^2$, достигнутые значения выгорания топлива и плотности продуктов деления равны соответственно

- средние: 42,8%, $0,8 \text{ г/см}^3$;
- максимальные: 63,7%, $1,18 \text{ г/см}^3$;

- мощность сборки № 2 (6 г урана-235 в твэле, 158 твэлов, ампульный канал $\varnothing 24$ мм) изменялась от 3,1 до 2,1 МВт при минимальном запасе до кризиса теплообмена 1,51; максимальная плотность теплового потока составила $7,8 \text{ МВт/м}^2$, достигнутые значения выгорания топлива и плотности продуктов деления равны соответственно

- средние: 37,4%, 0,69 г/см³;
- максимальные: 66,6%, 1,23 г/см³;
- мощность сборки № 3 (6 г урана-235 в твэле, 188 твэлов) изменялась от 4,65 до 3,08 МВт при минимальном запасе до кризиса теплообмена 1,25; максимальная плотность теплового потока составила 14 МВт/м², достигнутые значения выгорания топлива и плотности продуктов деления равны соответственно

- средние: 44,9%, 0,83 г/см³;
- максимальные: 93,0%, 1,72 г/см³.

3. Проведенные ресурсные испытания показали высокую работоспособность твэлов с повышенным содержанием урана и ТВС на их основе в условиях модернизированной активной зоны. Достигнутые параметры испытаний опытных ТВС соответствуют, а по некоторым показателям превышают штатные.

Литература

1. Клинов А.В., Цыканов В.А., Старков В.А., Пименов В.В., Чертков Ю.Б. Модернизация активной зоны реактора СМ для решения задач материаловедения // Атомная энергия. – 2002. – Т. 93. – №3. – С.167.
2. Гомин Е.А., Гуревич М.И., Майоров Л.В., Марин С.В. Описание применения и инструкция для пользователя программой MSU-RFFI для расчета методом Монте-Карло нейтронно-физических характеристик ядерных реакторов/Препринт ИАЭ-5837/5. – М.: ИАЭ, 1994.
3. Чертков Ю.Б., Старков В.А., Бестужева И.В., Чекалкин С.И. Усовершенствованная расчетная модель реактора СМ и результаты ее тестирования/Годовой отчет: Сб. ФГУП «ГНЦ РФ НИИАР», Дмитровград, 2004. – С. 17-19.
4. Старков В.А., Федосеев В.Е. Распределение температуры и плотности теплового потока по периметру твэла крестообразного сечения/Сб. трудов ОАО «ГНЦ НИИАР». – Дмитровград, 2003. – Вып. 2. – С. 3-8.
5. Гарусов Е.А., Грачев С.Д. Теплоотвод от твэла крестообразного поперечного сечения/Препринт ЛИЯФ № 660. – Л., 1981.
6. Грачев В.Д. Некоторые вопросы математической реализации метода конечных элементов в задачах реакторной физики/Препринт НИИАР-6 (652), 1986.
7. Бобров С.Н., Спиридонов Ю.Г., Махин В.М., Грачев А.Ф. Изучение поведения твэлов реактора СМ в режиме кризиса теплоотдачи/Сб. тр. ГНЦ РФ НИИАР. – Дмитровград, 1997. – Вып. 1. – С. 75.
8. Клинов А.В., Старков В.А., Чертков Ю.Б. Изменение характеристик активной зоны реактора СМ при изменении положения регулирующих органов // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2010. – № 4. – С. 55-63.

Поступила в редакцию 8.08.2011

ABSTRACTS OF THE PAPERS

УДК 621.039.51

Burnout Calculation in Complicated Geometry Region with Strong Absorption by First-flight Collision Probabilities Method \Т. Yu. Karpushkin; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetica» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2011. – 7 pages, 4 illustrations. – References, 6 titles.

A recovery method of first-flight collision probabilities matrixes in burnout process using average chords calculated for some states by stochastic neutron rays is presented. The calculation of infinite neutron breeding factor for transport reactor assembly in burnout process of materials using this method and comparison with calculation by other methods and programs is presented.

УДК 621.039.51

Option of IVG.1M Reactor Modernization with Partial Replacement of Process Channels \V. Kotov, I. Prozorova; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetica» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2011. – 9 pages, 1 table, 6 illustrations. – References, 4 titles.

Treatments of mixed core usage including installation of not complete set of new process channels in reactor but only parts of them are stated. It is shown that partial reactor channel replacement allows reactor upgrading and enhancing its functional capabilities.

УДК 621.039.5: 621.362

Self-Contained Thermionic Nuclear Power Plant for Offshore Gas and Oil Production Platforms \A. D. Krotov, G. E. Lazarenko, M. K. Ovcharenko, A. P. Pyshko, A. V. Sonko, V. I. Yarygin, D. G. Lazarenko; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetica» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2011. – 7 pages, 2 tables, 3 illustrations. – References, 7 titles.

The reactor unit for direct conversion of thermal energy into electrical energy with the electrical output between 1-5 MW oriented onto integration into equipment for offshore platforms have been discussed. A distinguishing feature of the reactor unit is the use of a thermionic conversion process with the thermodynamic cycle upper temperature of ~1600 K and lower temperature of ~700 K with the efficiency 15-20%.

УДК 621.039.519

Tests of SM Reactor Experimental Fuel Assemblies with Increased Uranium Load \V. A. Starkov, M. N. Svyatkin, A. V. Klinov, A. P. Malkov, V. E. Fedoseev, A. L. Petelin, Yu. B. Chertkov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetica» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2011. – 9 pages, 1 table, 9 illustrations. – References, 8 titles.

This paper presents the results of determination of power density and burnup distribution throughout the sections of three experimental fuel assemblies with increased uranium content in the rods (6g U235), obtained under calculated and experimental simulation of their operation conditions in the SM research reactor core. The mode of these distributions change during irradiation is analyzed. Thermal physic parameters of experimental FA rod operation are examined. The essential controlled tested parameters are given. It is shown that the reactor FA with increased fuel load stood well the total cycle of the reactor tests retaining its operational integrity under energy release, thermal load and fuel burnup appropriate to operational conditions of the modernized reactor core.