

ИСПЫТАНИЯ В РЕАКТОРЕ «МИР» ТВЭЛОВ ВВЭР В РЕЖИМАХ СО СКАЧКООБРАЗНЫМ УВЕЛИЧЕНИЕМ МОЩНОСТИ

**А.В. Бурукин, А.Ф. Грачев, В.В. Калыгин, В.А. Овчинников,
В.П. Смирнов**
ФГУП «ГНЦ РФ НИИАР», г. Димитровград



Рассмотрены методические особенности петлевых испытаний твэлов ВВЭР в исследовательском реакторе «МИР» в режимах со скачкообразным увеличением мощности. Выполнена большая серия экспериментов при различных условиях изменения мощности. Приведены некоторые результаты испытания твэлов ВВЭР-440 и ВВЭР-1000 с высоким выгоранием топлива.

Совершенствование эксплуатационных характеристик ядерного топлива – одна из основных задач, решение которых напрямую влияет на успешное развитие российской атомной энергетики. Необходимо увеличивать допустимое выгорание топлива, вводить маневренный режим эксплуатации, и самое главное – обеспечить выполнение современных требований к топливу в условиях проектных аварий и в нестационарных режимах. Все это невозможно без проведения экспериментальных исследований.

В настоящей работе приведена информация об испытаниях твэлов ВВЭР в исследовательском реакторе «МИР» [1] при моделировании ситуаций, связанных со скачкообразным повышением мощности (подъем мощности после продолжительной работы реактора на пониженном уровне со скоростью, превышающей скорость релаксации напряжений в оболочке твэла, которые возникают за счет воздействия на нее топливного сердечника). Как правило, интерес представляет увеличение около 100% линейной мощности твэлов, реализуемой в энергетическом реакторе. Рассматриваемый диапазон скорости изменения мощности находится в пределах от 0,01 до 1,0 Вт/см·с, что соответствует ожидаемой скорости изменения мощности при переходных режимах в твэлах ВВЭР [2].

Исследовательский петлевой реактор «МИР» предназначен для проведения ресурсных испытаний новых конструкций тепловыделяющих сборок (ТВС), фрагментов ТВС и отдельных твэлов ядерно-энергетических установок различного назначения. Одновременно в реакторе можно испытывать несколько экспериментальных ТВС, отличающихся конструкцией, содержанием делящегося материала в твэлах, требуемым уровнем энерговыделения, видом и параметрами охлаждающего теплоносителя. Это обеспечивается за счет принятой для реактора «МИР» канальной конструкции и особой структуры активной зоны: петлевые каналы, предназначенные для размещения исследуемых ТВС, расположены во втором и третьем

© *А.В. Бурукин, А.Ф. Грачев, В.В. Калыгин, В.А. Овчинников, В.П. Смирнов, 2008*

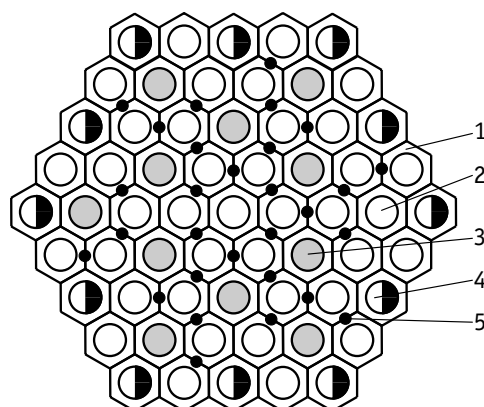


Рис. 1. Картограмма активной зоны реактора «МИР»: 1 – бериллиевый блок; 2 – канал с рабочей ТВС; 3 – петлевой канал; 4 – компенсатор реактивности с топливной догрузкой; 5 – стержень аварийной защиты и компенсации реактивности

ряду бериллиевой кладки таким образом, что каждый из них окружен шестью каналами с рабочими ТВС (рис.1). На стыке граней бериллиевых блоков размещены органы регулирования системы управления и защиты. Вокруг каждого петлевого канала расположено от трех до пяти регуляторов, что позволяет использовать их для реализации заданных режимов испытаний.

При моделировании в исследовательском реакторе условий, характерных для скачкообразного увеличения мощности штатной ТВС энергетического реактора, необходимо за фиксированное время увеличить мощность исследуемых твэлов, размещенных в петлевом канале, от исходного значения до заданного. Это может быть выполнено различными способами. Часто для реализации таких режимов применяют методы, основанные на использовании экспериментальных устройств с поглощающими экранами. В качестве поглощающих материалов для экранов используют различные поглотители, например, газообразные [3].

Физические и конструктивные особенности реактора «МИР» позволяют проводить подобные эксперименты без применения дополнительного поглотителя в облучательном устройстве путем перекомпенсации штатных органов регулирования [4]. Порядок проведения эксперимента предусматривает следующую последовательность действий. Облучательное устройство с исследуемыми твэлами устанавливают в канал петлевой установки, в которой поддерживают параметры теплоносителя, соответствующие ВВЭР. Реактор выводят на уровень мощности, обеспечивающий достижение в петлевом канале требуемых исходных условий эксперимента. При этом ближайшие к петлевому каналу органы регулирования введены в активную зону. После стабилизации всех параметров и достижения равновесных состояний производят увеличение мощности исследуемых твэлов. Для этого ближайшие к петлевому каналу органы регулирования извлекают с максимальной допустимой скоростью. Одновременно для компенсации вводимой положительной реактивности в активную зону погружают регуляторы, расположенные в других участках активной зоны. Использование данного метода имеет ряд особенностей. Во-первых, ограниченное время проведения эксперимента требует, чтобы в процессе перекомпенсации участвовало как можно меньше органов регулирования. В этом случае, за счет сокращения времени на выбор и подключения к работе необходимых органов регулирования, скорость увеличения мощности исследуемой ТВС будет максимальной. Кроме того, при уменьшении плотности теплоносителя в петлевом канале (например, в случае разгерметизации и снижения в нем давления) вводится положительная реактивность. Значение эффекта

реактивности зависит от выгорания топлива в рабочих ТВС, окружающих петлевой канал, и от глубины погружения ближайших к нему органов регулирования [5]. Поскольку увеличение мощности исследуемых твэлов обеспечивается извлечением органов регулирования, приемлемое значение эффекта реактивности, при котором с ним справляется система управления и защиты, обеспечивается соответствующим выбором выгорания топлива в рабочих ТВС.

Экспериментальная информация о поведении твэлов при скачкообразном повышении мощности необходима во всем диапазоне выгораний топлива. Особый интерес представляют исследования при высоких выгораниях. Поэтому для реактора «МИР» были разработаны конструкции облучательных устройств, которые позволяют проводить испытания как экспериментальных, так и полномасштабных твэлов с необходимым выгоранием топлива, которые извлечены из штатных ТВС энергетических реакторов. Необходимость получения информации непосредственно в процессе эксперимента потребовала разработки технологии изготовления рефабрикованных твэлов [6]. В защитной камере из облученного полномасштабного твэла дистанционно вырезают требуемый по размерам фрагмент, создают внутри него нужное давление, оснащают новыми концевыми деталями и вновь герметизируют. В качестве концевых деталей могут быть установлены различные датчики, например, для измерения температуры топлива, давления газов внутри твэла или удлинения оболочки. На рис. 2 приведены примеры указанных конструкций.

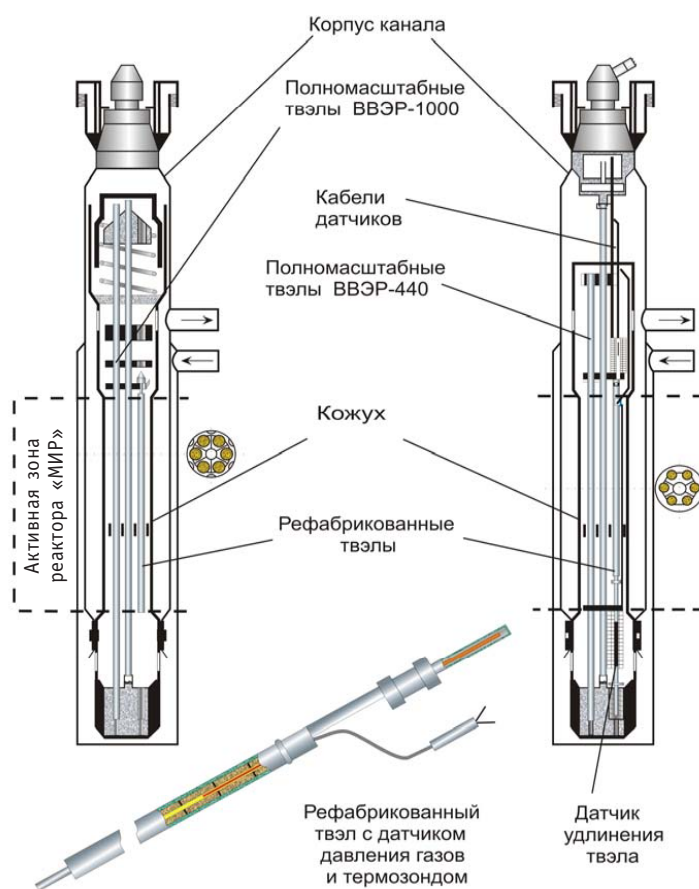


Рис. 2. Разборные облучательные устройства для испытаний полномасштабных и рефабрикованных твэлов ВВЭР

Поскольку работоспособность твэлов при быстром увеличении мощности в основном определяется физико-химическим и термомеханическим взаимодействием топлива с оболочкой [7], то жесткие требования по соответствию конструкции экспериментальной и штатной ТВС не предъявляются – это может быть и единственный твэл. Если одновременно испытывают несколько твэлов, то в экспериментальной ТВС желательно обеспечить максимально ровное поле энерговыделения. В этом случае большее количество твэлов будет работать в одинаковых условиях, что повышает статистическую значимость полученных результатов. Данному требованию, с учетом ограничений по габаритным размерам петлевого канала, в наибольшей степени удовлетворяет конструкция, в которой 6–12 твэлов равномерно размещены на одинаковом расстоянии от оси ТВС.

С учетом описанной методологии в реакторе «МИР» испытано более 80 твэлов ВВЭР (как полномасштабных, так и рефабрикованных) с выгоранием в диапазоне 15–70 МВт·сут/кгU. При проведении испытаний варьировали выгорание топлива в твэлах, начальную линейную мощность, амплитуду и скорость увеличения мощности, время выдержки при максимальной мощности. Начальные линейные мощности, как правило, были равны линейной мощности твэлов на последнем этапе их эксплуатации в энергетическом реакторе. Максимальные линейные мощности подбирали таким образом, чтобы превысить допустимый уровень, определяемый техническими условиями эксплуатации.

Кроме того, проведены испытания более 40 опытных твэлов типа ВВЭР различных модификаций, предварительное облучение которых до требуемого выгорания осуществлялось непосредственно в реакторе «МИР». Основные параметры экспериментов представлены на рис. 3, в табл. 1 и 2 [8].

Как видно из приведенных данных, параметры испытаний менялись в широких пределах. Несмотря на это, за все время экспериментов ни один рефабрикованный или полномасштабный твэл не вышел из строя в процессе испытаний.

Оснащение части рефабрикованных твэлов внутриреакторными детекторами позволило следить за изменением параметров непосредственно в процессе эксперимента. Например, важным фактором при работе в переходных режимах является выход газообразных продуктов деления (ГПД) из топлива, вызывающий повышение давления в твэле. Увеличение давления может происходить как в резуль-

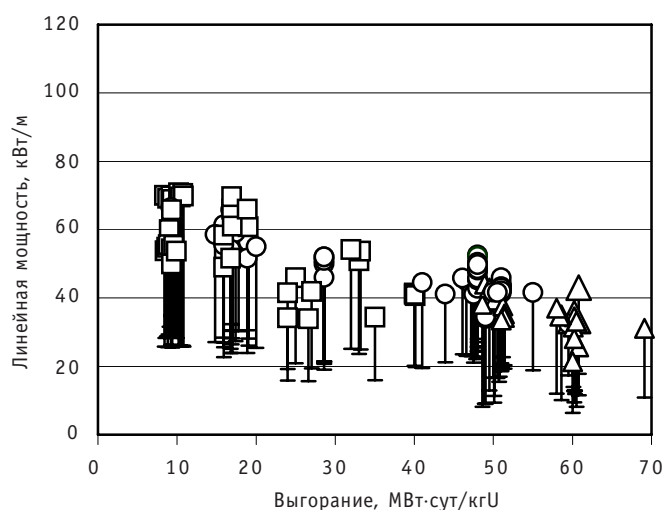


Рис. 3. Амплитуда изменения линейной мощности твэлов ВВЭР в зависимости от выгорания топлива:
○ – твэлы ВВЭР-1000; △ – твэлы ВВЭР-440; □ – опытные твэлы

Таблица 1

Параметры экспериментов с однократным увеличением мощности твэлов ВВЭР в реакторе «МИР»

Номер эксперимента	Кол-во твэлов, шт.	Длина активной части твэлов, м	Выгорание, МВт сут/kgU	Исходная линейная мощность, кВт/м	Приращение линейной мощности, кВт/м	Скорость подъема линейной мощности, кВт/м/мин
1	10	0.14	8.5 – 10	28 – 35	23.7 – 31.5	3.0 – 3.9
2	9	0.14	8 – 11	25.5 – 26	43.3 – 44.6	3.3 – 3.4
3	10	0.960	48	23 – 28	19.9 – 24.4	8.4 – 9.8
4	12	0.135	15 – 20	24 – 30	27.8 – 35.4	3.5 – 4.4
5	11	0.135	16 – 33	23 – 31	26.3 – 37.4	2.7 – 3.7
	6	0.195	24 – 35	16 – 21	18.2 – 25.0	1.8 – 3.7
6	12	0.95	51	19 – 21	22.6 – 25	0.2
7	4	0.95	29	19 – 21.5	27.0 – 30.5	2.3 – 2.5
	1	2.42	61	18	25.2	2.1
	1	3.53	29	21	29.3	2.4
8	3	0.95	51 – 61	12.5 – 17	15.4 – 20.5	0.6 – 0.8
	2	2.42	51 – 61	11.5 – 16	14.2 – 18.8	0.6 – 0.8
	1	3.53	50.1	11.3	18.7	0.8

Таблица 2

Параметры экспериментов со ступенчатым увеличением мощности твэлов ВВЭР в реакторе «МИР»

Номер эксперимента	Кол-во твэлов, шт.	Длина активной части твэлов, м	Выгорание, МВт сут/kgU	Исходная линейная мощность, кВт/м	Приращение линейной мощности, кВт/м	Скорость подъема линейной мощности, кВт/м/мин
1	6	3.53	44 – 48	21 – 23.5	8.4 – 9.4 + 12.7 – 14.1	0.24 – 0.26
2	2	0.94	59.5 – 69	18 – 19	1.5 – 1.7 + 18.2 – 20.6	0.41 – 0.54
	3	2.42	60	19.5 – 20		
	1	3.53	55	24.3		
3	4	0.93	40	20.5	12.3 + 8.2	8.2
4	3	0.73	49 – 60.5	9 – 10	10.5 – 15 +	0.1 – 0.34
	3	0.95	49 – 60	9 – 12	4.5 – 6 + 9 – 11	
5	3	0.4	49.5 – 58	10 – 12.4	6.6 – 8.1 +	0.12 – 0.86
	3	2.42	48.5 – 59	10 – 11.4	4.1 – 5.2 + 5.8 – 7 + 6.9 – 8.6	
6	6	0.4	56 – 61	12 – 17.1	6.2 – 8.9 + 6.3 – 9	0.1

тате роста температуры газа при подъеме мощности, так и за счет дополнительного выхода ГПД из топлива, особенно при высоких выгораниях. При низких значениях линейной мощности преобладает первый процесс, но при превышении порогового уровня существенный вклад в прирост давления вносят ГПД, вышедшие из топлива в компенсационный объем. Анализ временных зависимостей показаний датчиков давления в рефабрикованных твэлах в процессе эксперимента позволил установить диапазоны значений пороговой линейной мощности, при которой интенсифицируется газовыделение из топлива: для твэлов ВВЭР-440 с вы-

горанием ~ 50 и ~ 60 МВт·сут/кгU они составляют 28,0–31,0 и 22,0–25,0 кВт/м соответственно.

По показаниям термозондов было установлено соответствие между линейной мощностью и температурой топливного сердечника для различных выгораний топлива. Из приведенных на рис. 4 данных видно, что при фиксированной линейной мощности с увеличением выгорания температура топливного сердечника возрастает. В твэлах ВВЭР-440 при одинаковой линейной мощности и равном выгорании температура выше, чем в твэлах ВВЭР-1000.

Проведенные послереакторные материаловедческие исследования [9] показали, что для твэлов с выгоранием 50–60 МВт·сут/кгU состояние оболочек (окисление наружной и внутренней поверхностей, гидрирование и механические свойства) практически не изменилось. Содержание водорода во всех случаях не превышало 48 ppm.

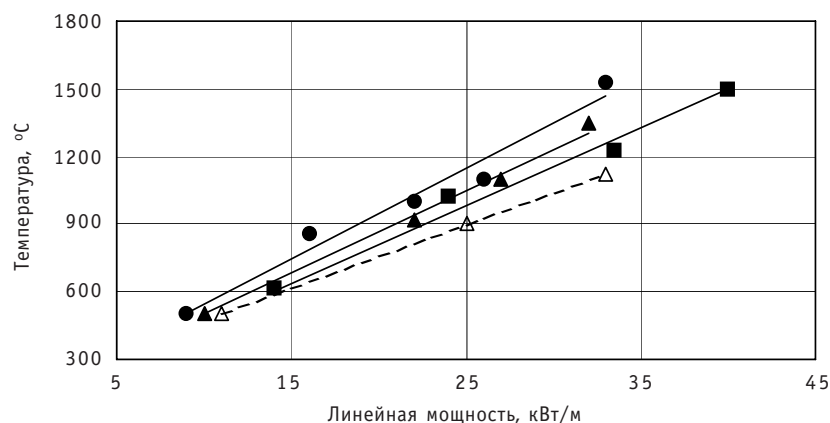


Рис. 4. Изменение температуры топливного сердечника в зависимости от линейной мощности: твэлов ВВЭР-440 при выгорании 50 (■); 56 (▲); 60 (●) МВт·сут/кгU; твэлов ВВЭР-1000 при выгорании 56 МВт·сут/кгU (△)

Испытания привели к незначительному увеличению наружного диаметра оболочки в центральной части твэлов, где линейные мощности были максимальными.

В результате испытаний произошло некоторое изменение геометрических параметров топливных таблеток и существенное изменение структуры диоксида урана, которое сопровождалось повышенным выходом ГПД из топлива под оболочку и миграцией нуклидов цезия в центральной части твэла в зоне максимального энерговыделения (рис. 5). Пики активности нуклидов цезия расположены на расстоянии 11 мм друг от друга, что соответствует высоте топливной таблетки. Перераспределение ^{137}Cs свидетельствует о повышении подвижности ГПД и их интенсивном выходе из топлива в свободный объем.

Наиболее значительные изменения структуры топливных таблеток произошли на участках твэлов с максимальной линейной мощностью: в частности, появились коаксиальные трещины, центральный канал практически исчез (рис. 6), сформировались зона газового распухания и зона рекристаллизованных зерен, которые для разных уровней линейной мощности проявляются в различной степени.

Выход ГПД в твэлах с выгоранием топлива 50–60 МВт·сут/кгU, полученный методом прокола оболочки, после испытаний достигал 40–50% (рис. 7).

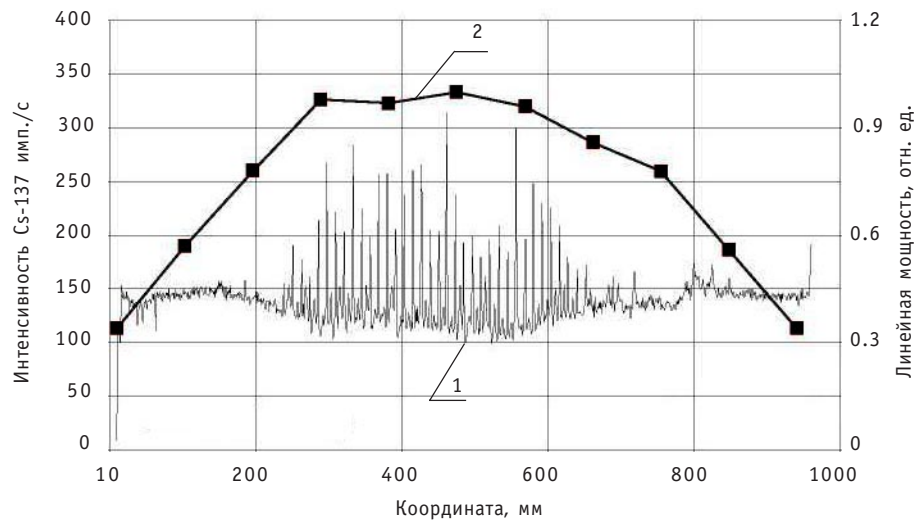


Рис. 5. Распределение Cs-137 (1) и линейной мощности (2) по высоте твэла после испытания



Рис.6. Макроструктура поперечных сечений твэлов ВВЭР с выгоранием 50 МВт-сут/кгU до (а) и после (б, в) испытания

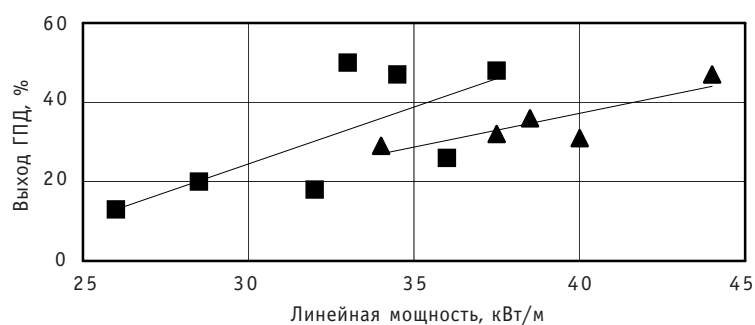


Рис. 7. Изменение выхода ГПД в зависимости от линейной мощности при выгорании топлива 50 (▲) и 60 (■) МВт-сут/кгU

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для исследовательского реактора «МИР» разработана и реализована методология проведения испытаний твэлов ВВЭР в режимах скачкообразного увеличения мощности, которая обеспечивает возможность проведения экспериментов с изменением параметров в широких диапазонах. Оснащение твэлов внутриреактор-

ными датчиками позволило определить параметры, при которых происходит интенсификация газовыделения из топлива, а также получить зависимость температуры топлива от линейной мощности. Проведенные многочисленные испытания твэлов ВВЭР с высоким выгоранием показали, что несмотря на значительные структурные изменения в топливном сердечнике, твэлы после испытаний сохранили герметичность, оболочки твэлов находятся в удовлетворительном состоянии и надежно выполняют свои функции.

Литература

1. Исследовательские реакторы НИИАР и их экспериментальные возможности/*Под научн. ред. проф. В.А. Цыканова*. – Димитровград: НИИАР, 1991. – 103 с.
2. Бемерт Ю., Юттнер К., Райнфрид Д. Эксперименты по моделированию скачкообразных изменений мощности для выявления повреждаемости твэлов ВВЭР// *Атомная энергия*. – 1989. – Т. 67. – Вып. 1. – С. 49-51.
3. Андреев В.И., Егоренков П.М., Колядин В.И. и др. Применение газообразного поглотителя для испытаний твэлов в нестационарных режимах// *Атомная энергия*. – 1981. – Т. 51. – Вып. 5. – С. 302-304.
4. Грачев А.Ф., Калыгин В.В., Малков А.П. и др. Изучение возможности проведения в реакторе «МИР» экспериментов со скачкообразным увеличением мощности твэлов// *Вопросы атомной науки и техники*. Сер.: Ядерная техника и технология. – 1993. – Вып. 1. – С. 41-49.
5. Калыгин В.В., Малков А.П. Влияние методов формирования режимов облучения на значение эффекта реактивности при обезвоживании петлевых каналов реактора «МИР»/Сборник трудов. – Димитровград: ФГУП «ГНЦРФ НИИАР», 1996. – Вып. 4. – С. 3-10.
6. Бровка В.В., Агафонов В.И., Мирошниченко Г.В., Зинковский В.И. Сварка под давлением облученных оболочек тепловыделяющих элементов// *Вопросы атомной науки и техники*. Сер.: Сварка в ядерной технологии. – 1989. – Вып. 4. – С. 6-10.
7. Бибилашвили Ю.К., Грачев А.Ф., Калыгин В.В. и др. Экспериментальные исследования влияния скачков мощности на состояние твэлов типа ВВЭР при различных выгораниях/Сборник докладов IV Межотраслевой конференции по реакторному материаловедению. – Димитровград, 1996. – С. 125-140.
8. Burukin A., Ilenko S., Ovchinnikov V., Shulimov V. Main Programs and Techniques for Examination of Behaviour of WWER Hight-Burnups Fuel in the MIR Reactor/ *Proceedings of 6-th International Conference WWER Fuel. Performance, Modelling and Experimental Support (19-23 September 2005, Albena, Bulgaria)*. – P. 497-505.
9. Смирнов А.В., Смирнов В.П., Цыканов В.А. и др. Характеристики топлива ВВЭР после эксплуатации в стационарных и переходных режимах. Прогнозирование сверхвысоких выгораний/Сборник докладов 6 Российской конференции по реакторному материаловедению. – Димитровград, 2001. – Т.1. – С. 3-16.

Поступила в редакцию 13.02.2008

УДК 621.039.58

The Automated Ultrasonic Device of Removal of Residual Pressure in Welded connections of the atomic power station \A.I. Trofimov, S.I. Minin, M.G. Kalenishin, A.I. Romantsov; Editorial board of Journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yademaya energetika» (Communications of Hight Schools. Nuclear power engineering). – Obninsk, 2008. – 7 pages, 7 illustrations. – References – 9 titles.

The method of removal residual pressure is submitted by influence of ultrasound a wave on welded connection during welding. Advantage of the submitted method before traditional methods is shown. The description of the automated ultrasonic device of removal of the residual pressure moving synchronously with the welding automatic device is given.

УДК 539:551.508

Correction of Data on Radionuclide Contents in the Atmospheric Boundary Layer as Inferred from the Measurements of Natural Radionuclide Contents \M.V. Propisnova, V.M. Kim; Editorial board of Journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yademaya energetika» (Communications of Hight Schools. Nuclear power engineering). – Obninsk, 2008. – 4 pages, 2 illustrations. – References – 18 titles.

Presented is a method used for correction of radio nuclide volumetric activities in the atmospheric boundary layer based on the measurements of ^7Be volumetric activity made at the neighboring observation sites.

УДК 621.039.51:004

Verification of SCALE 5 code package: Nuclear Safety \A.V. Egorov, S.N. Filimonov, V.V. Artisyuk, A.N. Shmelev; Editorial board of Journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yademaya energetika» (Communications of Hight Schools. Nuclear power engineering). – Obninsk, 2008. – 11 pages, 7 illustrations. – References – 13 titles.

The purpose of present paper is verification of licensed computer code package SCALE 5, used in INPE for criticality safety and burnup calculations. This verification oriented on fundamental problems of nuclear safety, constrained with criticality analysis. Criticality calculations of classical uranium and plutonium experiments (GODIVA, JEZEBEL) and heterogeneous spherical assembly for accurate definition of critical mass of transuranics (^{244}Cm , ^{237}Np , ^{238}Pu) has been done. Also sensitivity analysis of obtained results for nuclear data was presented. On the basis of sensitivity and uncertainly analysis suggested model for experiment with ^{234}U for specification its critical mass.

УДК 621.039.548

Creation of Neutron-Physical Conditions in the MIR Reactor Suitable for Testing VVER Fuel Rods under Local Accidental Conditions \V.V. Kalygin, I.V. Kiseleva, A.P. Malkov, V.N. Shulimov; Editorial board of Journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yademaya energetika» (Communications of Hight Schools. Nuclear power engineering). – Obninsk, 2008. – 8 pages, 1 table, 3 illustrations. – References – 13 titles.

Considered are issues of creation of conditions for safe testing of VVER fuel rods in the MIR reactor core under conditions characteristic of the LOCA accidents. The design of experimental devices was defined, core configuration and position of control rods were chosen so that the required parameters can be reached at a minimum reactor power and safety of the experiments can be provided. Data on the reactor testing results are presented.

УДК 621.039.548

Testing of VVER Fuel Rods in the MIR Reactor under Power Ramping Conditions \A.V. Burukin, A.F. Grachev, V.V. Kalygin, A.B. Ovchinnikov, V.P. Smirnov; Editorial board of Journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yademaya energetika» (Communications of Hight Schools. Nuclear power engineering). – Obninsk, 2008. – 8 pages, 2 tables, 7 illustrations. – References – 9 titles.

The testing methodology of standard and refabricated VVER fuel rods in the loop facility of research reactor MIR is considered at different fuel burnups under power ramping conditions. Taking account of the analysis of main requirements to such tests, methodical approaches to the tests were presented including peculiar features of the reactor core configuration and provision of a fast power increase. Summarized data on the performed in-pile experiments, where the above methodology was used, and results of post-irradiation material science experiments are presented.