

# **ИНТЕГРАЛЬНЫЕ РЕАКТОРНЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ ПО ИСПЫТАНИЮ МНОГОЭЛЕМЕНТНЫХ ФРАГМЕНТОВ ТВС ВВЭР-440 И ВВЭР-1000 ПРИ ПАРАМЕТРАХ АВАРИИ С ПОТЕРЕЙ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ. ОБОБЩЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ПО ЦИКЛУ ЭКСПЕРИМЕНТОВ «МАЛАЯ ТЕЧЬ»**

**А.В. Горячев, И.В. Киселева, В.М. Махин, В.Н. Шулимов**  
*ФГУП «ГНЦ РФ НИИАР», г. Димитровград*



Приведены основные результаты экспериментов на петлевой установке ПВП-2 реактора МИР по испытанию многоэлементных фрагментов ТВС реакторов ВВЭР-440 и ВВЭР-1000 при параметрах, характерных для конечной стадии аварии «малая течь» с некомпенсированной утечкой теплоносителя из первого контура.

В реакторе МИР более 10 лет проводятся испытания фрагментов ТВС ВВЭР в режимах аварий с потерей теплоносителя. В данной статье приведены основные сведения о методиках и результатах испытаний.

## **КЛАССИФИКАЦИЯ И ОСОБЕННОСТИ ПРОТЕКАНИЯ АВАРИЙ С ПОТЕРЕЙ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ НА ВВЭР**

В соответствии с принятой классификацией в зависимости от величины дефекта трубопроводов первого контура течи теплоносителя разделяются на малые, средние и большие, вплоть до максимальной проектной аварии (МПА). Малые течи на реакторе ВВЭР-1000 связывают с разрывом трубопроводов диаметром до 80 мм, МПА определяют как разрыв трубопровода  $\varnothing 850$  мм с двухсторонним истечением теплоносителя, весь промежуточный спектр дефектов относят к средним течам. Все перечисленные аварии, связанные с потерей теплоносителя, относятся к разряду проектных. Предусмотренные конструктором технические средства, если не происходит наложения нескольких отказов в работе оборудования, должны защищать активную зону реактора от перегрева. При этом температура топлива и других элементов ТВС не поднимается выше того значения, которое наблюдается при нормальной эксплуатации, что и обеспечивает безопасность активной зоны реактора. Исключение составляет МПА, при развитии которой не удастся избежать кратковременного перегрева твэлов. Согласно расчетному прогнозу Генерального конструктора реактора, температура оболочки может повышаться до 700-1100°C для различных групп твэлов. Не-

---

© **А.В. Горячев, И.В. Киселева, В.М. Махин, В.Н. Шулимов, 2004**

смотря на это, предусмотренные проектом пассивные и активные системы аварийного расхолаживания защищают активную зону от разрушения, но возможна разгерметизация части оболочек твэлов [1].

Практический интерес представляет постановка имитационных экспериментов, в которых реализуются максимальные (экстремальные) параметры, характерные для той или иной аварии, при которых происходит наибольшее разрушительное воздействие на активную зону. Для аварий «малая течь» (МТ) и «средняя течь» (СТ) объектом для изучения является конечная стадия при отказе системы подпитки, при которой в

активной зоне происходит раздел фаз теплоносителя и перегрев оболочек в результате осушения верхней части активной зоны. Если режим проектный (без дополнительных отказов оборудования), то параметры твэлов ниже номинальных, и поэтому нет предмета для исследования.

Особенность протекания аварий МТ и СТ состоит в том, что разделение фаз теплоносителя в активной зоне и, как следствие, перегрев оболочки происходит, как правило, при большем или близком давлении в первом контуре по сравнению с давлением газа внутри твэла. При этом уменьшается диаметр оболочки для необлученного твэла. Гидродинамические условия течения теплоносителя не ухудшаются. Вместе с тем в случае испытания высоковыгоревшего топлива возможно образование на оболочке вздутий. Основная задача таких экспериментов – изучение поведения твэлов и свойств материалов активной зоны, определение предельных параметров, при которых твэлы и другие элементы сохраняют свою целостность и прочностные характеристики, достаточные для сохранения охлаждения активной зоны и извлечения ТВС из реактора после завершения аварийного процесса.

Итак, цель испытаний и исследований состояла [2]:

- в подтверждении или уточнении критериев работоспособности твэлов и ТВС;
- в определении предельных параметров, при которых возможна разборка активной зоны после работы в режиме ухудшенной теплоотдачи;
- в получении данных для верификации и корректировки кодов.

Далее приведены основные результаты цикла экспериментов на реакторе МИР, выполненных по сценарию аварии «малая течь».

### **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПОСТАНОВКИ ИМИТАЦИОННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ НА РЕАКТОРЕ «МИР». МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ**

Экспериментальное оборудование для проведения имитационных аварийных испытаний вследствие их специфики (необходимость реализации на опытных твэлах экстремальных параметров, возможность разгерметизации или даже разрушения твэлов и реализация стадии повторного смачивания (режима закалки или QUENCH-режима)) должно удовлетворять следующим требованиям:

- допускать работу при высоких уровнях активности теплоносителя;
- обладать техническими средствами реализации заданных параметров, характерных для той или иной аварии, и повторного смачивания при выходе из состояния перегрева.

На момент постановки задачи (1991 г.) реакторные стенды, удовлетворяющие указанным требованиям, отсутствовали. На реакторе МИР эксплуатировалась петлевая установка ПВП-2 [3], в которой возможна длительная работа при объемной активности теплоносителя 4 Гбк/л, а при отклонении от режима нормальной эксплуатации – кратковременно до 40 Гбк/л. Вместе с тем соответствующие технические средства реализации заданных режимов испытания отсутствовали. Было принято решение о проведении модернизации первого контура установки ПВП-2, которую

планировали провести в два этапа:

1) дооснащение установки для проведения испытаний «малая течь» (этап выполнен);

2) реконструкция установки для проведения эксперимента МПА реактора ВВЭР (разработан проект, изготовлено основное оборудование и проведены его стендовые испытания).

Принятию соответствующих технических решений предшествовала разработка методики (технологии) проведения имитационных экспериментов [2].

Поскольку искомым в испытаниях «малая течь» является конечное состояние ТВС, при котором достигается максимальная температура твэла при заданном давлении в первом контуре, переходный процесс можно реализовать в герметичном контуре петлевой установки уменьшением расхода теплоносителя (по расчету 7-12 г/с). Эта схема эксперимента была принята в качестве основной, и для ее реализации на первом этапе дооснащения первого контура установки ПВП-2 был спроектирован и смонтирован узел обеспечения и измерения малого расхода теплоносителя и подогреватель на входе в канал, после чего появилась возможность выполнения указанных экспериментов. Различные схемы выполнения операции повторного смачивания и расхолаживания обеспечивали системы установки ПВП-2 и реактора МИР. Наиболее сложным для воспроизведения в имитационном эксперименте является переходный процесс первой стадии МПА реактора ВВЭР вследствие большой скорости изменения параметров теплоносителя и топлива. Для этого

требуются специальные технические средства: система имитации потерь теплоносителя, которая в настоящее время разработана и испытана на теплогидравлическом стенде, но на петлевой установке ПВП-2 до сих пор не смонтирована. Поэтому в настоящее время существует техническая возможность постановки имитационных экспериментов МТ и МПА без реализации первой стадии экспериментов «большая течь».

Для проведения аварийных имитационных экспериментов было разработано и изготовлено испытательное оборудование (рис. 1, 2), которое по мере накопления экспериментальных данных и опыта эксплуатации устройства совершенствовалось и модернизировалось. В частности, введена тепловая изоляция по всей длине подъемного участка канала Фильда, оптимизировано оснащение канала и фрагмента ТВС датчиками контроля параметров, разработана технология установки термоэлектротеплопреобразователей (ТЭП) в оболочке необлученных твэлов и датчиков контроля температуры топливных сердечников твэлов с высоким выгоранием. Тепловая изоляция снизила значение потребляемой мощности, что позволило приблизить конечное состояние фрагмента ТВС к реальному и сделать управляемым переходный процесс [2]. Разработаны 7- и 19-элементные фрагменты ТВС реакторов ВВЭР-440 и ВВЭР-1000, причем более предпочтительным является 19-элементный пучок, т.к. в нем реализу-

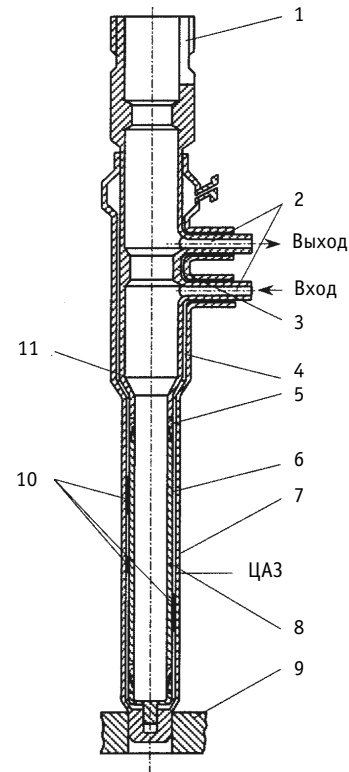


Рис.1. Общий вид канала: 1 – головка канала; 2 – патрубок циркуляционный; 3 – место уплотнения подвески; 4 – вакуумная полость; 5 – переходник сталь-цирконий; 6 – труба циркониевая; 7 – корпус защитный; 8 – датчик температуры; 9 – нижняя плита реактора; 10 – датчик нейтронного потока; 11 – корпус (ЦАЗ – центр активной зоны)

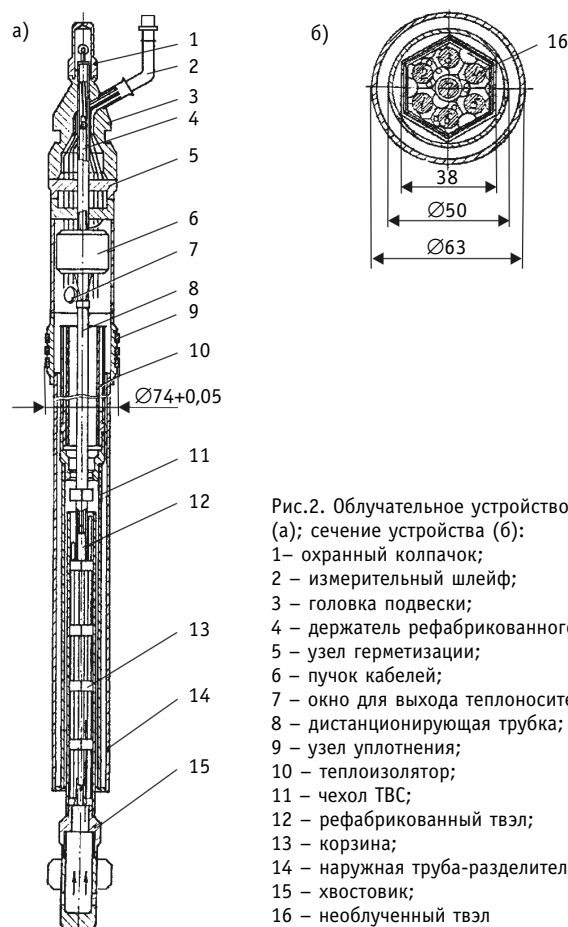


Рис.2. Облучательное устройство: общий вид (а); сечение устройства (б):

- 1 – охранный колпачок;
- 2 – измерительный шлейф;
- 3 – головка подвески;
- 4 – держатель рефабрированного твэла;
- 5 – узел герметизации;
- 6 – пучок кабелей;
- 7 – окно для выхода теплоносителя;
- 8 – дистанционирующая трубка;
- 9 – узел уплотнения;
- 10 – теплоизолятор;
- 11 – чехол ТВС;
- 12 – рефабрированный твэл;
- 13 – корзина;
- 14 – наружная труба-разделитель потока;
- 15 – хвостовик;
- 16 – необлученный твэл

ются все типы проходных ячеек в ТВС (центральные, граничные и угловые) и тем самым воспроизводится гидродинамика течения теплоносителя. Разработана типовая схема (рис.3) установки датчиков. В зависимости от конкретных целей экспериментов возможны различные схемы установки во фрагменте ТВС инструментovaných и неинструментovaných твэлов.

Для получения сравнительных данных о поведении необлученных и выгоревших твэлов (структурные изменения материала оболочки и топлива, отсутствие зазора в выгоревших твэлах, газовыделение из топлива при разогреве сердечника) в испытываемую ТВС устанавливают укороченные фрагменты отработавших штатных твэлов энергетического реактора, загерметизированных сваркой в защитной камере, и необлученные твэлы с пониженным обогащением топлива по  $^{235}\text{U}$ . С учетом технических ограничений при дистанционной загрузке выгоревших твэлов принято, что максимальное количество выгоревших твэлов, одновременно устанавливаемых в экспериментальную ТВС (ЭТВС) три, при этом в один выгоревший твэл устанавливают ТЭП в центр топливного сердечника. В настоящее время проведены испытания топлива водо-водяного энергетического реактора (ВВЭР) с выгоранием 50-60 МВт·сут/кг U.

Методика и технология проведения имитационных экспериментов должны быть таковы, чтобы в переходном режиме можно было исключить возникновение кризиса теплообмена, при котором процесс становится неуправляемым, и явления «захлебывания». Поэтому предварительно необходимо выпарить теплоноситель из подъемного участка при пониженной мощности, при которой охлаждение твэлов переходит в зак-

ризисную область, минуя кризис теплообмена (кризис первого рода). Заданная динамика изменения температуры оболочки обеспечивается воздействием на мощность реактора.

Реализуется дисперсный режим течения теплоносителя в верхней половине фрагмента ТВС. В результате специальных исследований с применением датчиков паросодержания показано, что на расстоянии около 0,2 м от границы раздела фаз объемное паросодержание составляет не менее 0,95 и зарегистрированы мелкодисперсные капли воды в паре [4]. Указанный режим характерен как для условий аварий с частичным осушением активной зоны ВВЭР, так и для второй стадии МПА реактора ВВЭР-1000 – повторного залива. Таким образом, в отличие от многих стендовых («Параметр») и реакторных (PBF, FR-2, NSRR) экспериментов в испытаниях на реакторе МИР режим течения теплоносителя в ЭТВС близок к режиму течения теплоносителя в активной зоне ВВЭР, что важно для получения реальных данных о состоянии твэлов и ТВС после аварии.

Возможность постановки интегральных имитационных экспериментов на исследовательском реакторе определяется также их безопасностью. При обосновании безопасности эксперимента необходимы данные о накоплении и выделении в теплоносителе водорода различного происхождения, о выходе и распространении по контуру радиоактивных продуктов деления при разгерметизации твэлов и другие. Все это является предметом изучения, т.к. на стадии подготовки эксперимента указанные параметры могут быть только оценены [5].

### ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИНТЕГРАЛЬНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ «МАЛАЯ ТЕЧЬ»

Испытания фрагментов ТВС реактора ВВЭР в режиме «малая течь» проводили по специальной программе, при разработке которой учитывали необходимость

- достижения максимальной температуры оболочки, которая возможна на твэлах активной зоны реактора ВВЭР-1000 со средней (380 Вт/см) и высокой (447 Вт/см) линейной плотностью теплового потока в номинальном режиме;
- вариации давления в первом контуре, которое изменяется в широких пределах, характерных для аварии типа «малая течь», вследствие чего создаются различные условия нагружения оболочки – от сжатия до растяжения при перепаде давления 0,5–1,5 МПа;
- проведения экспериментов с различным временем выдержки фрагмента ТВС при экстремальных параметрах, которые обусловлены значением максимальной температуры.

Режимы испытаний:

- номинальный;
- имитационный с осушением твэлов при высоком и пониженном давлении теплоносителя в конечном состоянии фрагмента ТВС;
- повторное смачивание (QUENCH – режим) разогретой тепловыделяющей сборки;
- длительное расхолаживание.

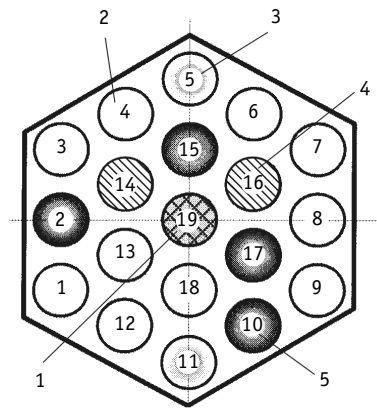


Рис.3. Схема размещения инструментированных твэлов в дистанционирующей решетке экспериментальной ТВС: рефабрикованный твэл с ТЭП внутри топливного сердечника (1); неинструментированный твэл (2); твэл с ТЭП внутри топливного сердечника (3); рефабрикованный неинструментированный твэл (4); твэл с тремя ТЭП на оболочке (5)

Режимы испытаний реализуются последовательно в одном эксперименте. Данные по результатам экспериментов «малая течь» приведены в табл. 1 [2, 4-10].

В экспериментах МТ-1, МТ-2, МТ-3 испытывали фрагменты ТВС реактора ВВЭР-1000, в экспериментах МТ-5 и МТ-5П – ТВС реактора ВВЭР-440.

При проведении посттестовых исследований изучали

- формоизменение оболочки;
- окисление оболочки;
- изменение структуры материала оболочки;
- механические свойства оболочки;
- газовыделение из топлива (эксперимент МТ-5П);
- содержание водорода в оболочке.

Эксперименты «малая течь» МТ-1, МТ-2, МТ-5, МТ-5П (необлученные твэлы) проведены в первом контуре петлевой установки при более высоком давлении, чем давление газа под оболочкой. Только в экспериментах МТ-3 и МТ-5 (фрагмент содержал выгоревший твэл) давление в первом контуре было меньше давления газа под оболочкой. Повторное смачивание твэлов во всех экспериментах реализовано быстрым сбросом мощности в заданный момент времени. Длительное расхолаживание твэлов осуществляли теплоносителем первого контура петлевой установки при температуре около 50°C.

Основные выводы по результатам испытаний сформулированы на основании данных измерения параметров непосредственно в канале реактора и посттестового исследования фрагментов в защитных камерах.

1. При температуре оболочки, не превышающей 900-950°C, концентрация водорода в теплоносителе (при нормальных условиях) составляет 12-15 см<sup>3</sup>/кг (по результатам измерения в процессе экспериментов МТ-1, МТ-3, время испытаний приведено в табл. 1). Концентрация водорода в теплоносителе, измеренная в эксперименте МТ-2, составила 80 см<sup>3</sup>/кг [5]. Водород образовался в результате пароциркониевой реакции, что подтвердили результаты посттестовых исследований.

Опыт испытаний подтверждает безопасность принятой технологии обращения с теплоносителем, содержащим водород в значительных количествах. Сброс парогазовой среды осуществляется в специальные емкости и разбавляется азотом. Объем помещений достаточен для исключения взрывоопасной концентрации в случае аварийной разгерметизации контура.

2. Все ЭТВС, кроме ЭТВС, испытанной в эксперименте МТ-2, были разобраны в защитной камере: твэлы, извлеченные из дистанционирующих решеток, разгерметизировались на стадии выдержки и разрушились при повторном смачивании, поэтому исследования проводили на горизонтальных шлифах после заливки фрагмента компаундом [2,6].

3. Радиоактивность, вышедшая в контур петлевой установки при разрушении изначально необлученных твэлов (эксперимент МТ-2), измеренная с помощью технологического спектрометра и штатной системы контроля радиационной безопасности, не превышала 8 Ки, что соответствует объемной активности теплоносителя 0,8 ГБк/л. В частности, выход <sup>133</sup>Xe из необлученного топлива составил 10<sup>-4</sup> [7,8]. Установлены особенности выхода радионуклидов из топлива высоковыгоревшего твэла. По данным измерения состава газа под оболочкой твэлов (табл. 2) [9] и по скорости спада активности теплоносителя основной вклад в радиоактивность при разгерметизации высоковыгоревшего топлива вносят радиоактивные благородные газы (РБГ) и изотопы цезия.

В процессе эксперимента МТ-5 первый возможный выход радионуклидов из выгоревшего твэла при разгерметизации оболочки (800-850°C) не был зарегистриро-

Таблица 1

**Основные параметры экспериментов «малая течь»**

Эксперимент	Число твэлов в ЭТВС		Давление в в первом контуре петлевой установки в режиме ухудшенной теплоотдачи, МПа	Реализованный температурный диапазон, °С	Время осушения, мин	Время выдержки при максимальной температуре, мин	Состояние твэлов	
	необлученных	выгоревших					герметичное	негерметичное
С повышенным давлением в первом контуре (обжиг оболочки):								
МТ-1	18	-	12	530-950*	72	72	+	
МТ-2	19	-	12	До 1200	100	3		+
МТ-5	6	1**	4,9	750-1250	40	2		+
МТ-5П	6	1***	5,6	700-930	35	3	+	
С пониженным давлением (вздутие оболочки):								
МТ-3	19	-	4	650-730	25	25	+	

\* Кратковременно, неинструментированный угловой твэл.

\*\*, \*\*\* Выгорание 60 и 56 МВт-сут/кг U соответственно.

ван, а установлен только при посттестовых исследованиях (разгерметизация твэлов установлена по наличию окисления внутренней поверхности оболочки). При последующем увеличении температуры до 1250°C зафиксирован выход РБГ и цезия в теплоноситель (до 1%).

Полученные результаты показывают, что в рассматриваемых условиях выход из облученного топлива осколочных газов и других продуктов деления под оболочку твэла и в теплоноситель невелик, и «залповый» выход радиоактивности в контур не накладывает ограничений на проведение экспериментов. Импульсный выход радионуклидов в контур установлен на стадии изменения агрегатного состояния теплоносителя в канале (замена пара на жидкость).

4. Для всех твэлов, в которых давление газа под оболочкой было меньше, чем давление в контуре петлевой установки, в зоне осушения зафиксировано уменьшение диаметра оболочек необлученных твэлов до полного исчезновения исходного диаметрального зазора между топливом и оболочкой и продавливание оболочки между таблетками («антибамбук»)[2, 6]. Это оказывает отрицательное влияние на состояние оболочки при повторном смачивании. В рефабрикованных твэлах (эксперименты МТ-5П и МТ-5) из-за отсутствия зазора между таблетками и оболочкой продавливание оболочки не зафиксировано [9]. Для твэла фрагмента ТВС (эксперимент МТ-3) перепад давления составлял 1,5 МПа и направлен от центра твэла, увеличение

Таблица 2

**Состав газа под оболочкой облученного твэла с выгоранием 56 МВт-сут/кг U (эксперимент МТ-5П)**

Твэл	Объемная доля, %						
	He	N <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	Ar	CO <sub>2</sub>	Kr	Xe
Необлученный	99,86	<0,12	<0,02	<0,003	<0,001	-	-
Выгоревший	69,97	<0,39	<0,08	<0,003	<0,001	2,58	26,98

Примечание. Выход активности из топлива оценен в 7-9%, максимальная температура 1050°C, скорость нагрева 2-3°C/с, время выдержки 2 мин.

диаметра оболочки при таком перепаде составило 70 мкм.

5. При повторном смачивании твэлов, которое во всех экспериментах выполнялось быстрым уменьшением удельной мощности (ввод в активную зону стержней аварийной защиты), значение термошока составляло 300-470°C для всех фрагментов ТВС [10]. Для фрагмента ТВС в эксперименте МТ-2 термошок вызвал хрупкое разрушение оболочек твэлов [6].

6. Установлено увеличение массового содержания водорода в оболочках твэлов на участке осушения до  $5 \cdot 10^{-3}\%$  (МТ-3) и  $2 \cdot 10^{-2}\%$  (МТ-5П). Содержание водорода в оболочках твэлов в нижней части ЭТВС, залитой водой, не превышало  $4 \cdot 10^{-3}\%$ , а в оболочке твэла с выгоревшим топливом не отличалось от «свежих» твэлов МТ-5П [6].

7. В температурном диапазоне 850-950°C толщина оксидной пленки на поверхности оболочки не превышала 20 мкм для твэлов с необлученным и выгоревшим топливом. Особенности в окислении оболочек выгоревшего твэла нет [9].

8. Механические характеристики оболочек, испытанных до температуры 890°C, измеренные на кольцевых образцах, остались на исходном уровне, что подтверждается и неизменностью структуры материала в зоне осушения, которая идентична для необлученных и рефабрикованных твэлов. В оболочке твэлов из фрагмента ТВС (эксперимент МТ-2) произошло значительное увеличение размера зерна, разрушение оболочки хрупкое, что свидетельствует о потере материалом пластичности при повышении температуры более 1000°C [2,6]. Принципиального различия в поведении оболочек необлученного и выгоревшего твэлов не установлено [9].

9. Взаимодействия дистанционирующих решеток (нержавеющая сталь) с материалом оболочки не зарегистрировано даже в наиболее «высокотемпературном» эксперименте МТ-2. При анализе температурных условий дистанционирующих элементов установлена их более низкая температура, чем смежных участков оболочки. Этот факт объясняется эффективным охлаждением решеток и прилегающих участков твэла при дисперсном режиме течения теплоносителя.

**В заключение** следует отметить, что по результатам непосредственного измерения параметров твэлов в канале реактора после разгерметизации твэлов (активность в контуре, водород в теплоносителе), в реакторе и по данным посттестового исследования делается вывод о безопасности проведения имитационных экспериментов типа LOCA.

До температуры 900-950°C оболочки твэлов сохраняют прочностные свойства на исходном уровне при незначительном окислении и гидрировании материала. При температуре более 1000°C происходит значительное увеличение толщины оксидной пленки и потеря прочностных свойств оболочки. На стадии повторного смачивания зафиксировано хрупкое разрушение оболочки.

Газовыделение из выгоревшего топлива под оболочку находится на низком уровне (~10%) при выгорании до 56 МВт-сут/кг U, что связано с низкой температурой топлива (900-1050°C).

По результатам сравнения результатов посттестового исследования необлученных и выгоревшего твэлов делается вывод, что поведение материала оболочек этих твэлов при нагреве в аварийном режиме не имеет существенных отличий.

В дисперсном режиме охлаждения решетки эксплуатируются при относительно низкой температуре, что снижает уровень взаимодействия решетки с оболочкой. Сравнительно низкая температура решетки обеспечивает сохранение ее прочностных свойств, что имеет существенное значение для разборки активной зоны ВВЭР после аварии и транспортабельности ТВС.



### Литература

1. *Спасков В.П., Шумский А.М., Семишкин В.П. и др.* Реакторные исследования аварийного поведения активной зоны ВВЭР на петлевой установке ПВП-2 реактора МИР / Тр. междунар. конф. «Теплофизические аспекты безопасности ВВЭР. Теплофизика-98». – Обнинск: ГНЦ РФ-ФЭИ. – 1998. – Т. 2. – С. 42-51.
2. *Махин В.М., Шулимов В.Н.* Опыт проведения реакторных испытаний твэлов водо-водяных энергетических реакторов в режиме аварии с потерей теплоносителя (эксперименты «малая течь» на реакторе МИР) / Сб. тр. – Димитровград: ГНЦ РФ НИИАР, 1997. – Вып. 4. – С. 35-50.
3. *Анисимов В.П., Бендерская О.С.* Экспериментальные возможности петлевой установки ПВП-2 РУ МИР для испытаний твэлов ВВЭР в режимах с потерей теплоносителя / Сб. докл. семинара по динамике ЯЭУ. – Димитровград: НИИАР, 1966.
4. *Джусов Ю.П., Махин В.М., Шулимов В.Н.* Использование метода электрозондирования в реакторных экспериментах с осушением активной зоны ВВЭР в режиме «малая течь» / Тр. междунар. конф. «Теплофизические аспекты безопасности ВВЭР. Теплофизика-95». – Обнинск: ГНЦ РФ-ФЭИ, 1995. – Т. 1. – С. 127-132.
5. *Бендерская О.С., Махин В.М., Абанькин А.К., Зотов Э.А.* Газохимический мониторинг в петлевых экспериментах по обоснованию безопасности реакторов типа ВВЭР / Сб. докл. IV Межотраслевой конференции по реакторному материаловедению. – Димитровград: ГНЦ РФ НИИАР, 1995. – Т. 1. – С. 210-220.
6. *Махин В.М., Шулимов В.Н.* Экспериментальное изучение поведения многоэлементных ТВС и твэлов ВВЭР в аварийных режимах эксплуатации с потерей теплоносителя / Тр. междунар. конф. «Теплофизические аспекты безопасности ВВЭР. Теплофизика-98». – Обнинск: ГНЦ РФ-ФЭИ, 1998. – Т. 2. – С. 27-36.
7. *Алексеев А.В., Махин В.М., Шулимов В.Н.* Применение кода MELCOR для расчетного анализа параметров испытаний 19 – элементного фрагмента ТВС ВВЭР в канале исследовательского реактора МИР (эксперимент «малая течь-2») / Сб. тр. Димитровград: ГНЦ РФ НИИАР, 2000. – Вып. 4. – С. 49-60.
8. *Алексеев А.В., Махин В.М., Шулимов В.Н., Ильенко С.А.* Посттестовые расчеты по коду MELCOR выхода и переноса радионуклидов в реакторном испытании «малая течь-2» / Сб. докл. отраслевой конференции «Теплогидравлические коды для энергетических реакторов (разработка и верификация)». – Обнинск: ГНЦ РФ-ФЭИ, 2001. – С. 184-186.
9. *Горячев А.В., Киселева И.В., Махин В.М. и др.* Результаты исследования поведения высоковывожеревших и «свежих» твэлов ВВЭР-440 в условиях аварии с осушением активной зоны / Тр. междунар. конф. «Теплофизические аспекты безопасности ВВЭР. Теплофизика-98». – Обнинск: ГНЦ РФ-ФЭИ, 1998. – Т. 2. – С. 338-346.
10. *Махин В.М., Шулимов В.Н., Киселева И.В. и др.* Особенности повторного залива твэлов ВВЭР в аварии типа ЛОСА / Сб. докл. отраслевой конференции «Гидродинамика и безопасность АЭС». – Обнинск: ГНЦ РФ-ФЭИ, 1999. – С. 138-140.

Поступила в редакцию 9.08.2004

## ABSTRACTS OF THE PAPERS

### УДК 621.039.56

*On Expediency of Change of Requirements RNS RI APP to Sodium Density a Component of Reactivity of a Feedback In Fast Reactors \A.V. Danilytshev, D.G. Elistratov, V.I. Matveev; Editorial board of Journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2004. – 16 pages, 5 tables, 10 illustrations. – References, 11 titles.*

Most generalizing requirement GSR-88/89 to all effects of reactivity is added in RNS RI APP with the additional limiting requirement of negativity sodium density reactivity coefficient. At the analysis of the major accidents obviously expressed communication of their consequences with the given additional requirement is not found out. It is shown, that at observance by the designer of basic requirements OPB-88/ in a combination to correct selection of interrelation of all others a component of reactivity and Thermal-physical properties of materials of an active zone the additional requirement of negativity sodium density reactivity may be considered as the account excessive.

### УДК 621.039.56

*On Inverse Kinetics Method for Reactivity Determination \B.D. Abramov; Editorial board of Journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2004. – 13 pages, 1 illustration. – References, 29 titles.*

In the paper some mathematical problems of the reactors neutron kinetic simulation and reactivity determination are considered.

### УДК 621.039.51:519.85

*Direct Simulation of Thermal Neutron Scattering by Monte Carlo Method Using Free Gas Model and Short Collision Time Approximation \P.A. Androsenko, M.R. Malkov, N.A. Soloviev; Editorial board of Journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2004. – 11 pages, 6 illustrations. – References, 12 titles.*

Direct simulation algorithms of thermal neutron scattering using free gas scattering law and short collision time approximation realized in BRAND code collection are described. The comparison of BRAND algorithms with MCNP algorithms and modified MCU algorithms is given. An example of calculation task on neutron penetration through O in H<sub>2</sub>O barrier is given. The agreement between BRAND results and MCU results is rather good but there is disagreement between BRAND results and MCNP results. The reason for this disagreement is likely to be caused in the fact that BRAND carry out the calculations using the algorithms that recommended by ENDF-6 format whereas the algorithms of MCNP is corrected to better coincide with benchmark experiments results.

### УДК 621.039.524: 621.039.526

*The Method for Description of Fission Fragments by Two Pseudo-Fission Fragments. Part II – Testing. \Yu. V. Volkov, O.B. Duginov; Editorial board of Journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2004. – 7 pages, 5 tables, 4 illustrations. – References, 5 titles.*

The model for description of isotope transitions taking into account the most significant for the neutron balance isotopes and two pseudo-fission fragments has been tested. This model was applied for thermal and fast reactors.

### УДК 621.039.524.4: 621.039.519.2

*Integral In-Pile Experiments with a VVER-Type Fuel Assembly «SB-LOCA»-Test. A.V. Goryachev, I.V. Kiseleva, V.M. Makhin, V.N. Shulimov; Editorial board of Journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2004. – 9 pages, 2 tables, 3 illustrations. – References, 10 titles.*

Results of 19-rod and 7-rod VVER-type fuel assembly tests «SB LOCA» in research reactor MIR are presented. The influence of regime parameters LOCA and design peculiarities of fuel assembly on fuel behaviour was investigated.