

ИСПЫТАНИЯ В РЕАКТОРЕ МИР ТОПЛИВА ВВЭР-1000 В УСЛОВИЯХ, МОДЕЛИРУЮЩИХ II И III СТАДИИ ПРОЕКТНОЙ АВАРИИ «БОЛЬШАЯ ТЕЧЬ»

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



Рассмотрены методические вопросы подготовки и проведения в реакторе МИР эксперимента, моделирующего условия, характерные для II и III стадий аварии «Большая течь» реактора ВВЭР-1000. Представлены сведения об основных результатах эксперимента.

Ключевые слова: реактор МИР, топливо ВВЭР-1000, проектная авария, «Большая течь», методика испытания, формоизменение оболочек.

Key words: MIR Reactor, VVER-1000 fuel, design-basis accident, «Large-Leak», testing procedure, cladding deformation.

Для обоснования безопасности действующих и проектирования новых реакторов необходимо изучить поведение твэлов и ТВС в режимах проектных аварий. Одной из наиболее тяжелых по последствиям является авария с потерей теплоносителя, которая может быть вызвана разрывом трубопровода первого контура охлаждения с максимальным диаметром 800 мм («Большая течь»). Такая авария классифицируется как максимальная проектная для энергетической установки.

Результаты исследований, проведенных на стендах с электрообогреваемыми имитаторами твэлов и в защитных камерах с выгоревшими твэлами, показывают, что последствия аварии во многом определяются исходным состоянием твэлов и условиями эксплуатации. Важную роль играют выгорание топлива, линейная мощность твэлов на момент возникновения течи, параметры теплоносителя, а также максимальная температура твэлов, скорость ее изменения, длительность нагрева, условия повторного залива.

Сложность расчетного моделирования всей совокупности процессов в активной зоне при аварии «Большая течь» вызывает необходимость проведения модельных интегральных реакторных экспериментов, в которых в качестве испытываемых объектов используются многоэлементные сборки твэлов. Такие эксперименты было решено проводить в исследовательском реакторе МИР [1], который имеет в своем составе специализированную пароводяную петлевую установку ПВП-2. Результаты выполненных исследований [2] доказали возможность безопасного

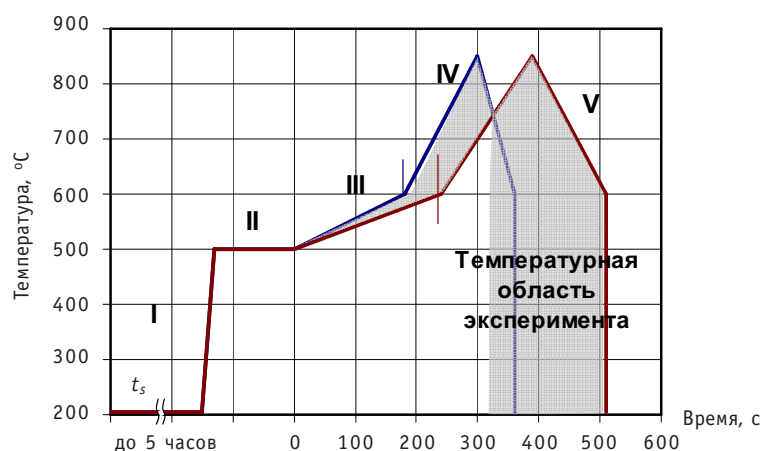


Рис. 1. Температурный сценарий эксперимента: I – режим выпаривания (до 5 ч); II – выдержка при температуре высыхания оболочки твэлов (150–250 с); III – IV – V – режим второй и третьей стадии максимальной проектной аварии (III – 180–240 с, IV – 120–150 с, V – 60–120 с)

проведения в реакторе испытаний твэлов ВВЭР в режимах, моделирующих аварии с потерей теплоносителя.

Для реализации первой стадии максимальной проектной аварии ВВЭР-1000 требуется специальный контур охлаждения, оснащенный техническими средствами имитации разрыва главного циркуляционного трубопровода. В настоящее время соответствующая экспериментальная установка на реакторе МИР отсутствует. Поэтому пока проводят испытания с моделированием условий, характерных для второй и третьей стадии аварии, которые представляют самостоятельный интерес, так как именно на второй стадии прогнозируется наибольшее число разгерметизировавшихся твэлов.

Температурный сценарий эксперимента выбран на основании расчетных температурных зависимостей для переходного процесса в активной зоне с учетом физических и технических возможностей реактора МИР (рис. 1). Температура, с которой начинается моделирование нагрева и охлаждения твэлов, составляет 500°C. До 700°C скорость нагрева не лимитируется, в дальнейшем она должна быть не менее 1°C/с. Скорость охлаждения твэлов после достижения максимальной температуры не менее 1,5°C/с. Расчетный термоудар при повторном смачивании на третьем этапе аварии обеспечивается быстрым сбросом мощности реактора (ввод в активную зону стержней аварийной защиты) с последующим увеличением расхода теплоносителя с температурой 100°C.

Для проведения испытания была использована экспериментальная ТВС, представляющая собой фрагмент ТВС ВВЭР-1000, состоящий из 19 укороченных твэлов (длина топливного сердечника 1000 мм): 16 твэлов со свежим топливом и три рефабрикованных твэла (выгорание ~50 МВт·сут/кгU), которые изготовлены из отработавшего твэла ВВЭР-1000.

Для определения условий испытания экспериментальная ТВС была оснащена датчиками температуры и давления:

- 12 термоэлектрических преобразователей для измерения температуры оболочки – по три на четырех твэлах в зоне горячего пятна;
- три термоэлектрических преобразователя для измерения температуры центра топливного сердечника – по одному в двух твэлах со свежим топливом и в рефабрикованном твэле, установленном в центре экспериментальной ТВС;
- три датчика давления газа под оболочкой – на трех твэлах со свежим топливом;

- по одному термоэлектрическому преобразователю в области перегрева на оболочках твэлов с датчиком давления;
- три термоэлектрических преобразователя для измерения температуры теплоносителя – один на входе в пучок твэлов, два на выходе.

Схема расположения твэлов представлена на рис. 2.

Суммарную мощность экспериментальной ТВС в режиме разогрева оболочки определяли относительным методом по показаниям ионизационной камеры, абсолютную привязку осуществляли методом теплового баланса при работе в режиме, близком к номинальному, с учетом экспериментально определенных уточняющих коэффициентов.

Минимальное давление в первом контуре, при котором может работать петлевая установка, составляет 1,3–1,7 МПа, что значительно превышает остаточное давление в ВВЭР-1000 при аварии «Большая течь». Для создания модельного перепада давления на оболочке

5,5–6 МПа исходное давление гелия под оболочкой составляло 2,7 МПа. Режим испытания, характерный для второй и третьей стадий аварии, был реализован в герметичном контуре петлевой установки при давлении 1,7 МПа. Нагрев осуществляли при расходе теплоносителя 8–11 г/с путем увеличения мощности реактора с расчетной скоростью.

Эксперимент проводили в два этапа: предварительное облучение и реализация параметров второй и третьей стадий аварии ВВЭР-1000. Основное назначение первого этапа – накопление необходимого количества радионуклидов для последующего радиометрического анализа. На данном этапе параметры теплоносителя не моделировали, мощность ограничивали максимальной линейной мощностью рефабрикованного твэла (250 Вт/см). На втором этапе параметры испытаний полностью определялись сценарием эксперимента в соответствии с рис. 1.

Важным условием при подготовке и проведении эксперимента является обеспечение минимальной неравномерности энерговыделения по сечению пучка. В этом случае все твэлы попадают в режим перегрева, что улучшает качественные показатели эксперимента, в том числе и статистику. Достигалось это профилированием обогащения топлива в свежих твэлах, которое было снижено до 2,5%, что соответствует концентрации делящихся нуклидов (с учетом ^{239}Pu) в выгоревшем до 50 МВт·сут/кгU топливе. Кроме того, вокруг петлевого канала были размещены рабочие ТВС реактора МИР со свежим топливом, и все ближайшие к петлевому каналу органы регулирования полностью извлекали из активной зоны. В результате коэффициент неравномерности энерговыделения не превысил значения 1,15.

Оснащение экспериментальной ТВС внутриреакторными детекторами позволило отслеживать изменение параметров в режиме реального времени (рис. 3, 4). Начало реализации температурного сценария, приведенного на рис. 1, соответствует времени 19:39. Динамика изменения температуры оболочки в различных сечениях приведена для твэла в одной ячейке. Для твэлов, расположенных в дру-

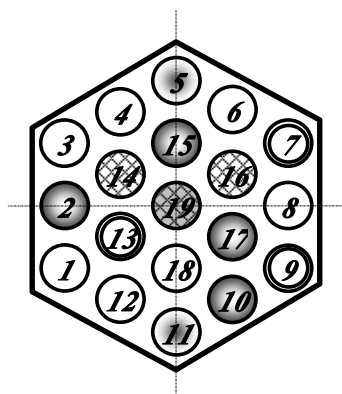


Рис. 2. Схема размещения твэлов в экспериментальной ТВС: свежие твэлы – неинструментированные (1, 3, 4, 6, 8, 12, 18), с тремя термоэлектрическими преобразователями на оболочке (2, 10, 15, 17), с датчиком давления и термоэлектрическим преобразователем на оболочке (7, 9, 13), с термоэлектрическим преобразователем внутри топливного сердечника (5, 11); рефабрикованные твэлы – неинструментированные (14, 16), с термоэлектрическим преобразователем внутри топливного сердечника (19)

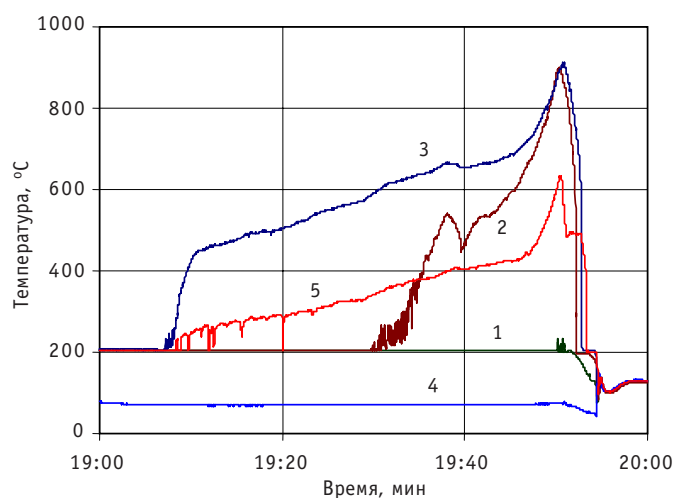


Рис. 3. Температура оболочки твэла 2 на расстоянии от опорной решетки 562 (1), 757 (2), 887 мм (3). Температура теплоносителя на входе (4) и на выходе (5) из экспериментальной ТВС

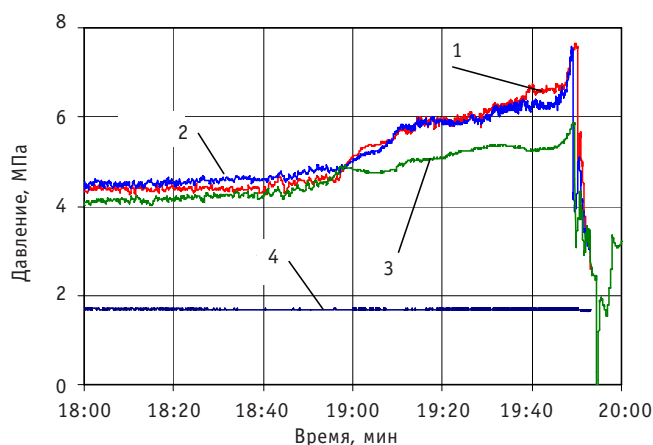


Рис. 4. Давление газа под оболочкой твэлов 9 (1), 7 (2), 13 (3) и в первом контуре (4)

гих ячейках, изменяются только максимальная температура в соответствии с коэффициентом неравномерности энерговыделения и немного область перегрева оболочки.

В ходе экспериментов установлено:

- параметры твэлов, характерные для второй стадии аварии «Большая течь», достигаются при мощности экспериментальной ТВС ~ 45–48 кВт;
- при высоте топливного сердечника 1000 мм размер горячего пятна в режиме второй стадии аварии составляет не менее 400 мм;
- все датчики давления зафиксировали разгерметизацию оболочки на стадии ее разогрева;
- температура оболочки, при которой произошла разгерметизация твэлов, составляет ~ 820°C;
- неравномерность температуры по периметру твэла вследствие низкой теплоотдачи и отсутствия межячеечного перемешивания теплоносителя может достигать 80–100°C.

В процессе послереакторных материаловедческих исследований экспериментальной ТВС было выявлено:



Рис. 5. Характер деформации оболочек рефабрикованного (слева) и свежего (справа) твэлов

- раздутие и разгерметизация оболочек твэлов;
- увеличение диаметра оболочек локализовано на участке, соответствующем зоне осушения активной части ЭТВС;
- участки максимальной окружной деформации оболочек относительно равномерно распределены как по поперечному сечению, так и по высоте осушенной зоны активной части экспериментальной ТВС;
- максимальная относительная блокировка проходного сечения находится в интервале 20–30%;
- разгерметизация оболочек носит характер пластичного разрыва;
- поведение оболочек выгоревших и свежих твэлов в условиях испытаний, реализованных в эксперименте, не отличается (рис. 5), что объясняется, по-видимому, отжигом радиационных дефектов в облученных оболочках на стадии нагрева твэлов при достижении температуры $\sim 500^\circ\text{C}$;
- дистанционирующие решетки оказывают существенное влияние на охлаждение пучка твэлов. На это указывает резкое снижение деформации оболочек перед дистанционирующей решеткой, находящейся в зоне осушения, и полное отсутствие деформации оболочек под решеткой.

Проведенные исследования позволили получить экспериментальные данные, необходимые для расчетных кодов, описывающих термомеханическое состояние оболочки твэлов.

Литература

1. Исследовательские реакторы НИИАР и их экспериментальные возможности/Под научн. ред. проф. В.А. Цыканова. Димитровград: НИИАР, 1991. – 103 с.
2. Калыгин В.В., Киселева И.В., Малков А.П., Шулимов В.Н. Формирование нейтронно-физических условий для проведения в реакторе МИР испытаний твэлов ВВЭР в режимах аварий с потерей теплоносителя//Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2008. – №2. – С. 58-65.

Поступила в редакцию 31.07.2009

condensation mode in the event of the beyond design basis accident has been carried out at the GE2M-PG large-scale facility. The tests were carried out under conditions of natural circulation, both in primary (condensing steam) and in the secondary (boiling water) circuits of the facility at primary circuit steam pressures P_{s1} : 0.21, 0.36, 0.77 MPa. The empirical correlations for prediction of the thermal capacity of heat-exchange apparatus working in the mode of steam condensation from pressure difference between circuits were obtained.

УДК 621.039.53

VVER-1000 Fuel Irradiation in the MIR Reactor under Conditions Simulating II and III Stage of the Design-Basis «Large-leak» Accident \A.V. Alekseev, A.V. Goryachev, V.V. Kalygin, I.V. Kiseleva, V.N. Shulimov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2009. – 5 pages, 5 illustrations. – References, 2 titles.

Presented are the testing procedure and results of a VVER-1000 fuel assembly fragment incorporating 19 fuel elements in the MIR reactor channel under conditions of the second and third stage of the «Large Leak» accident. In the experiment the final stage of the accident was simulated which takes place under non-compensatory escape of coolant from the primary cooling circuit as a result of rupture of the pipe having maximum diameter. The main purpose of the test is obtaining data on the cladding deformation of fuel elements with different fuel burnup under the above conditions.

УДК 621.039.7:546

Determination of Radiation Heterogeneity and Damaged Volume of Multiphase Actinide Compositions \A.A. Kozar; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2009. – 9 pages, 5 illustrations. – References, 12 titles.

The quantitative determination of radiation heterogeneity is proposed for multiphase actinide compositions. This parameter gives possibility to compare them radiation stability degree relative to a self-irradiation by heavy charged particles without the detailed description of these systems. The matrixes radiation heterogeneity is determined depending on diameter of included actinide microspheres and microcylinders. The calculation of matrixes damaged volume is made for different concentrations of included actinide microspheres and microcylinders depending on them diameter. It is shown, that increase of actinide phase size enables to increase its contents in a matrix without rise of dose load on a frame.

УДК 621.039.526:621.039.54

Investigation of Properties of Modified Oxides Structured by Nanotechnology \I.S. Kurina, O.V. Serebrennikova, V.N. Rumyantsev, A.M. Dvoryashin; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2009. – 8 pages, 1 table, 4 illustrations. – References, 17 titles.

Research results on the $\text{PuO}_2 + \text{MgO}$ fuel composition with CeO_2 as a PuO_2 simulator are presented. The water nanotechnology for the production of oxide ceramic materials, developed in IPPE, is used for fabrication of powders and pellets. This technology includes obtaining precipitate, consisting of particles of different sizes as well as of nanoparticles, which is further calcinated, pressed and sintered. It results in modifying structure of the sintered pellets. Modified pellets have anomalously high thermal conductivity measured by the axial thermal current method.

УДК 621.039.534

Specificities of Reactor Coolant Pumps Units with Lead and Lead-Bismuth Coolant \A.V. Beznosov, M.A. Anotonenkov, P.A. Bokov, V.S. Baranov, M.C. Kustov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2009. – 6 pages, 3 illustrations.

The results of analysis of the impact of specific properties of lead and lead-bismuth coolant in the characteristics of their flow in the flow of the main circulating pumps and auxiliary power units with these coolants. The impossibility of cavitation (in its traditional sense) in a flow of impeller pumps, pumping lead and lead-bismuth coolants. The results of experimental studies discontinuities of the heavy liquid metal coolant and discussed conditions for the occurrence of cavitation in the flow of gas coolant. Is substantiated miscalculation of circulation pumps, pumping lead and lead-bismuth coolants, wetting the walls restricting the flow of traditional methods for water and sodium coolant.