

кального парогенератора насыщенного пара. — Труды ЦКТИ, 1982, вып. 199, с. 37—43.

9. **Кругликов П.А.** Выбор параметров тепловых схем АЭС с водоохлаждаемыми реакторами с учетом ре-

жимных факторов и требований унификации. Автореф. дис. на соискание ученой степени канд. техн. наук. Л., ЦКТИ, 1985. 22 с.

Поступила в Редакцию 25.04.16

УДК 621.039.548

РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЯ В РЕАКТОРЕ МИР ТВЭЛОВ ВВЭР-1000 С ВЫСОКИМ ВЫГОРАНИЕМ ТОПЛИВА В УСЛОВИЯХ АВАРИИ С ПОТЕРЕЙ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ

*Алексеев А.В., Горячев А.В., Ижutow А.Л., Дреганов О.И., Киреева Л.В., Киселева И.В., Шулимов В.Н.
(АО «ГНЦ НИИАР», г. Димитровград)*

Для лицензирования эксплуатации на АЭС топлива ВВЭР необходимо обоснование его безопасности в условиях проектных аварий. Определяющей по степени воздействия на состояние твэлов является авария с большой течью теплоносителя. В такой аварии в первый момент (первая скоротечная стадия) температура оболочки твэлов с максимальной тепловой нагрузкой может достигать 1000 °С. Однако длительное (в течение нескольких минут) отрицательное воздействие экстремальных параметров на твэлы в активной зоне реактора происходит в период протекания второй стадии переходного процесса (стадия повторного залива). В соответствии с расчетным прогнозом температура оболочки твэлов на этой стадии может повышаться до 700 °С и выше. Изучение поведения твэлов на этой стадии развития аварии с учетом термошока (резкое понижение температуры при подаче воды в активную зону реактора от системы пассивной безопасности — третья, конечная стадия переходного процесса) является важной и актуальной задачей. Базой для проведения экспериментов являлся исследовательский реактор МИР [1].

В 2001—2010 гг. приоритетной задачей являлось изучение деформирования оболочки твэлов в составе ТВС. Эксперименты проводили с использованием многоэлементных сборок, которые формировались как фрагмент рабочей ТВС ВВЭР-1000 [1—3]. Основным вывод, который был сделан на этом этапе, — уменьшение проходного сечения для теплоносителя в активной зоне не превышает 30%, при этом обеспечено достаточное охлаждение твэлов. Свойства материала оболочки, которые определяют ее целостность, сохранились на высоком уровне.

С 2014 г. в реакторе МИР проводят испытания в условиях аварии с большой течью теплоносителя, приоритетной задачей которых является изучение поведения твэла как отдельного элемента активной зоны реактора. Основные задачи, которые решают в экспериментах и послереакторных исследованиях, — определение параметров разгерметизации оболочки, изучение вопросов, связанных с фрагментацией, осевым перемещением и возможным выходом топлива за пределы оболочки, свойств материала оболочки и топлива.

Устройство [4] для проведения реакторных экспериментов имеет в своем составе следующие основные узлы:

- активную часть с одним твэлом с выгоревшим топливом;

- пять дистанционирующих решеток, расположенных на расстоянии 200 мм одна от другой, для крепления твэла;

- теплоизолятор — обечайку для уменьшения потока тепла на корпус экспериментального устройства;

- два электронагревателя;

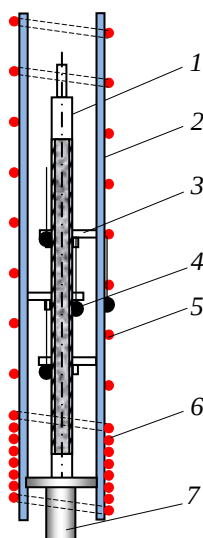
- датчики контроля;

- узел герметичного вывода кабелей связи датчик—вторичный прибор и электропитания нагревателя;

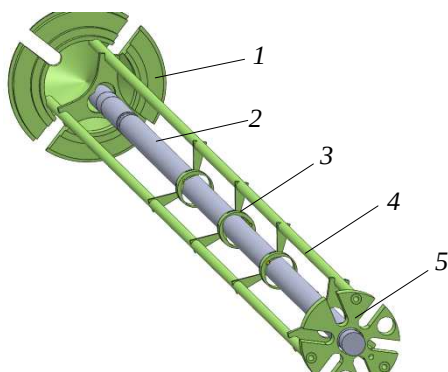
- две импульсные трубки для подачи в экспериментальное устройство воды на остановленном реакторе и отвода газа из верхней части под зеркало бассейна реактора;

- головку для установки подвески в корпус канала и его герметизации (рис. 1, 2).

Наличие двух электронагревателей позволяет установить первоначальную температуру оболочки твэла и обеспечить начальный расход теплоносителя — перегретого водяного пара.



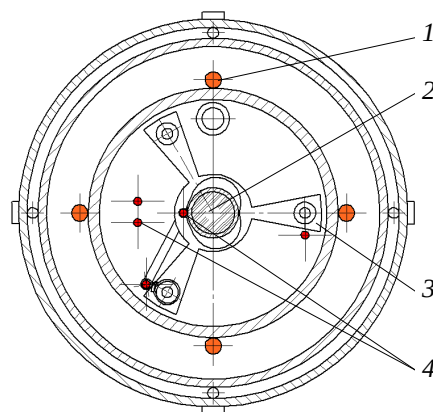
Р и с. 1. Схема центральной части экспериментального устройства: 1 — твэл; 2 — труба с электронагревателями; 3 — дистанционирующая решетка; 4 — термоэлектрический преобразователь; 5, 6 — верхний и нижний электронагреватель соответственно; 7 — датчик давления



Р и с. 2. Схема крепления твэла в экспериментальном устройстве: 1 — верхняя решетка; 2 — твэл; 3 — дистанционирующая решетка; 4 — опорная трубка; 5 — опорная решетка

Дистанционирующие решетки имеют специальную конструкцию, которая позволяет закрепить термоэлектрический преобразователь таким образом, что рабочий спай прижимается к оболочке при установке твэла в дистанционирующую решетку (рис. 3). Возможны две схемы установки термоэлектрического преобразователя: рабочий спай находится внутри дистанционирующей решетки и на 5—10 мм выше. Термометрическая характеристика узла крепления термоэлектрического преобразователя для двух схем установки различная.

При определении температуры оболочки между решетками учитывают поправки к показаниям термоэлектрического преобразователя, так как влияние дистанционирующих решеток



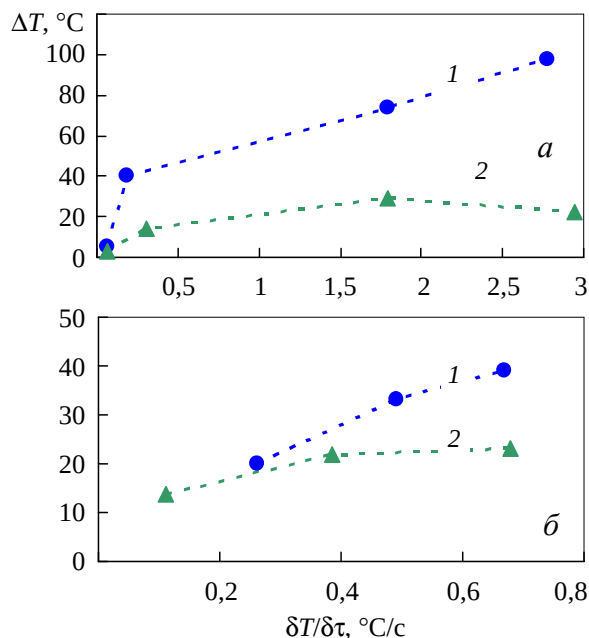
Р и с. 3. Сечение экспериментального устройства: 1 — электронагреватель; 2 — твэл; 3 — дистанционирующая решетка; 4 — термоэлектрический преобразователь

на распределение температуры оболочки по высоте велико. Поправки, которые зависят от скорости нагрева твэла, измерены на лабораторном стенде с использованием имитатора твэла с внутренним электронагревателем (рис. 4).

В эксперименте измеряли:

температуру теплоносителя (водяного перегретого пара) на входе и выходе из экспериментального устройства;

температуру оболочки твэла в трех точках по высоте (на участках расположения дистанционирующих решеток);



Р и с. 4. Изменение разности температуры оболочки имитатора твэла между решетками и показанием термоэлектрического преобразователя при 300 (а) и 600 °C (б) от скорости роста температуры при расположении рабочего спая термоэлектрического преобразователя внутри дистанционирующей решетки (1) и на 5—10 мм выше (2)

относительное энерговыделение в канале с помощью детектора прямого заряда с эмиттером, изготовленным из гафния;

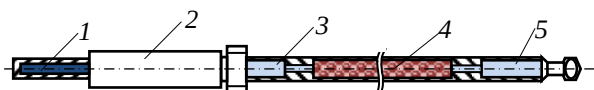
давление газа под оболочкой твэла.

Регистрацию параметров эксперимента при повышении мощности проводили 1 раз в секунду. Внутренняя полость экспериментального устройства соединена с атмосферой. Испытание твэла проводится в пароаргоновой среде. Для удаления воздуха и заполнения экспериментального устройства аргоном разработан специальный технологический стенд. Стенд используется также для подачи воды после останова реактора.

После подготовки оборудования к проведению эксперимента реактор выводится на мощность. Динамика повышения мощности и ее значение на конечной стадии разогрева определяются соответственно заданной скоростью роста и максимальной температурой оболочки.

В конструкции твэла предусмотрен свободный объем, разделенный на две части по отношению к топливному сердечнику (рис. 5). Это обусловлено установкой датчика давления газа под оболочкой твэла, который по условиям работы должен находиться в зоне минимальной температуры (в нижней части канала).

Внутренняя полость твэла заполнена гелием, давление под оболочкой — расчетная величина. Гелий подается в верхний свободный объем с последующей герметизацией твэла. При заполнении газом твэла с повышенной ураноемкостью и высоким выгоранием топлива необходима выдержка не менее 4 ч после создания давления в верхнем свободном объеме. Это связано с большим гидравлическим сопротивлением топливного сердечника из диоксида урана. Время выдержки установлено по расчетно-экспериментальному определению гидравлического сопротивления топливного столба из спеченного диоксида урана с разным выгоранием. Давление гелия под оболочкой после заполнения твэла измеряется датчиком давления в нижнем свободном объеме. Как показал опыт, при



Р и с. 5. Экспериментальный твэл с датчиком давления: 1 — ферромагнитный сердечник; 2 — датчик давления; 3, 5 — нижний и верхний свободный объем соответственно; 4 — топливный сердечник

такой технологии заполнения расчетное давление устанавливается во всем объеме твэла.

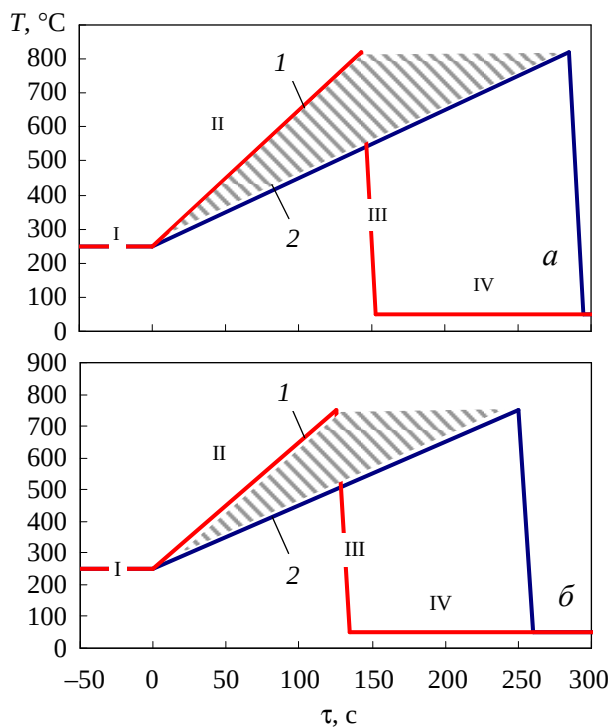
Эксплуатационные возможности и технические характеристики устройства определены при испытании в петлевом канале реактора МИР. Проведены два эксперимента с температурой оболочки твэла 750—850 °С. Для эксперимента использовали твэл с утоненной оболочкой без центрального отверстия в топливном сердечнике.

Возможность использования устройства для испытания топлива ВВЭР подтверждена корреляцией результатов, полученных непосредственно в канале реактора и при послереакторном исследовании [5, 6].

Геометрические размеры твэла, который использовался в экспериментах, — оболочка размером 9,1×0,585 мм из сплава Э-110 на основе губчатого циркония, топливная таблетка размером 7,8 мм без центрального отверстия с размером зерна 25 мкм, длина топливного столба 1000 мм, общая длина твэла (включая датчик давления) 1455 мм. Параметры испытаний — максимальная температура оболочки твэла 800—820 °С — эксперимент № 1, 700—750 °С — эксперимент № 2, средняя скорость нагрева оболочки твэла до максимальной температуры 2—4 °С/с, понижение температуры оболочки твэла на 400—450 °С при заливе восходящим потоком воды со скоростью повышения уровня воды в объеме с твэлом 1—3 см/с.

Параметры экспериментов в канале реактора МИР максимально приближены к расчетным для проектной аварии с потерей теплоносителя на ВВЭР-1000.

До вывода реактора на мощность электронагревателями создается начальный расход пара. При увеличении мощности реактора до надежно контролируемой штатными приборами (момент включения автоматического регулятора мощности) увеличивается расход пара за счет тепла, выделяемого в экспериментальном твэле. Температура оболочки твэла повышается до 250—270 °С (участок I температурного сценария на рис. 6). Скорость изменения параметров на данном этапе переходного процесса не задается. На участке II твэл разогревают с заданной скоростью, что обеспечивается увеличением мощности реактора с расчетным темпом. При достижении заданной температуры оболочки

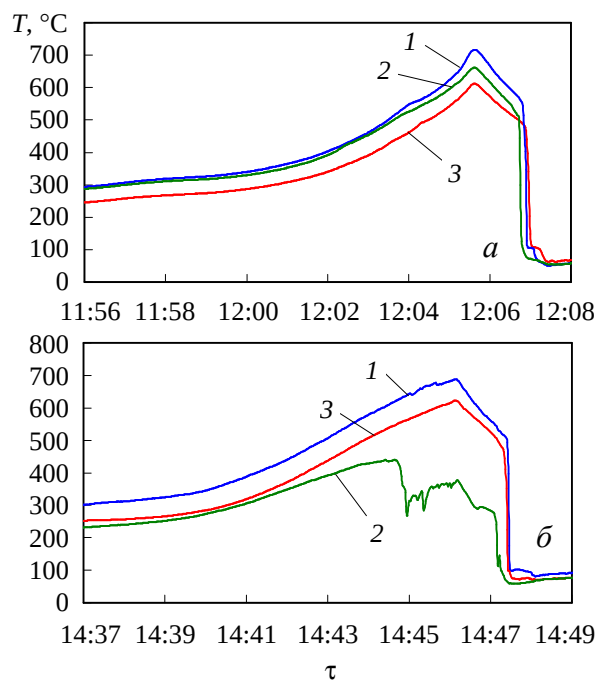


Р и с. 6. Температурные сценарии эксперимента № 1 (а) и 2 (б) со скоростью роста температуры оболочки 4 (1) и 2 °C/c (2): I—IV — участки переходного процесса

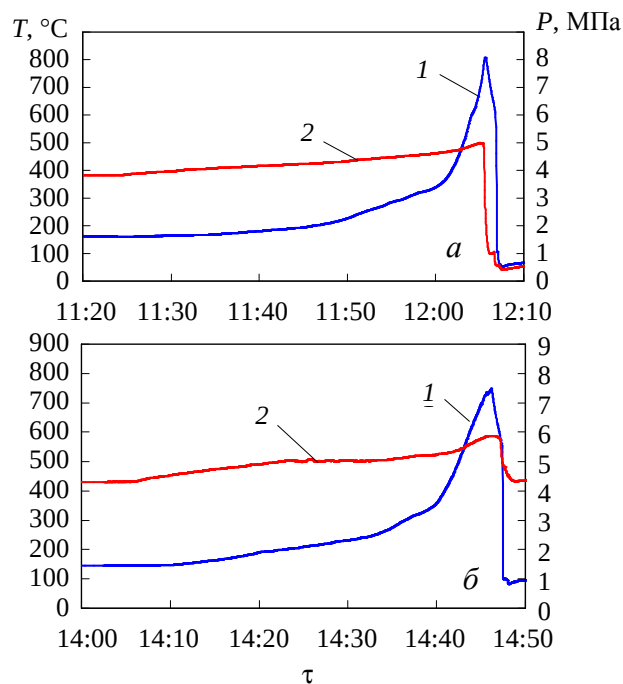
реактор переводят в подкритическое состояние. Захолаживание твэла с созданием термошока 400—450 °C (участок III переходного процесса) осуществляют подачей воды на вход экспериментального устройства. Этап IV — длительное расхолаживание.

Температура оболочки в зоне деформации в экспериментах № 1 и 2 получена по показаниям ТЭП (рис. 7) с учетом поправок (см. рис. 4). Максимальная температура оболочки твэла в эксперименте № 1 составила 807 °C (рис. 8). Высотная координата, где зафиксирована максимальная температура, располагается ниже центральной дистанционирующей решетки на 50—70 мм. На этой координате зафиксированы максимальная деформация оболочки и фрагментация топливных таблеток (рис. 9). Твэл в эксперименте № 1 разгерметизировался при 770 °C и перепаде давления на оболочке 4,81 МПа (см. рис. 8, а). Разгерметизация подтверждена наличием разрыва оболочки (рис. 10).

Разрыв оболочки произошел на координате 435 мм от начала топливного столба (65 мм ниже центральной дистанционирующей решетки), что соответствует координате с максимальной температурой оболочки. Длина образовавшегося разрыва составляет 1,6 мм, раскрытие 0,4 мм.

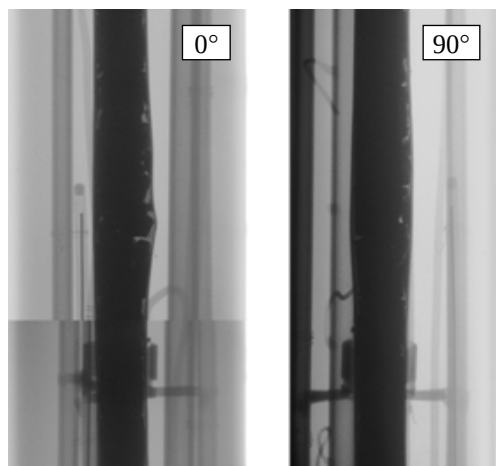


Р и с. 7. Изменение во времени показаний термоэлектрического преобразователя на уровне центральной (1), нижней (2) и верхней дистанционирующей решетки (3) в эксперименте № 1 (а) и 2 (б)

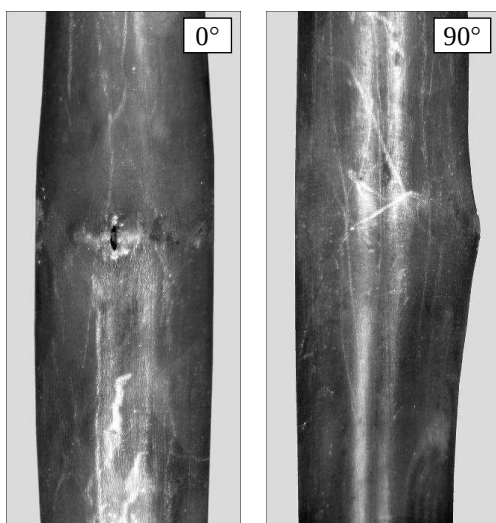


Р и с. 8. Изменение во времени максимальной температуры (1) и давления газа под оболочкой твэла (2) в эксперименте № 1 (а) и 2 (б)

Относительно невысокая скорость уменьшения давления в нижнем компенсационном объеме твэла свидетельствует о значительном гидравлическом сопротивлении топливного столба.



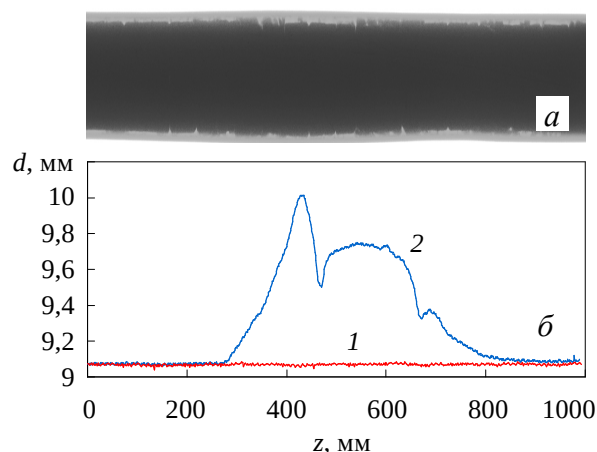
Р и с. 9. Рентгенограмма твэла после эксперимента № 1



Р и с. 10. Внешний вид оболочки твэла на участке разрыва в эксперименте № 1

В эксперименте № 2 максимальная температура оболочки составила 748 °С на отметке 30 мм ниже центральной дистанционирующей решетки. На этой координате была зафиксирована максимальная деформация оболочки (рис. 11). На профилограмме видны два минимума деформации, что вызвано влиянием дистанционирующих решеток. В области максимальной деформации оболочка оторвалась от топливного сердечника и образовался газовый зазор (см. рис. 11, а). Дальнейшее увеличение диаметра оболочки происходило под действием внутреннего давления газа.

Твэл в эксперименте № 2 остался герметичным (см. рис. 8, б). При визуальном осмотре после испытания деформация оболочки с образованием вздутия, характерного для образования разрыва оболочки, не обнаружена. Целостность оболочки подтверждена при ее проколе в целях сбора и анализа газа после эксперимента.



Р и с. 11. Рентгенограмма твэла на участке максимального увеличения диаметра оболочки после эксперимента № 2 (а) и его профилограмма (б) до (1) и после (2) испытания

Таким образом, экспериментальным путем подтверждена правильность технических решений для реализации исходных параметров и показано, что при температуре 748 °С и перепаде давления на оболочке 5,77 МПа (расчетный прогноз для проектной аварии с большой течью на ВВЭР-1000) твэл остался герметичным.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алексеев А.В., Горячев А.В., Киселева И.В. и др. Методика и результаты испытания в канале реактора МИР фрагмента ТВС ВВЭР-1000 в режиме максимальной проектной аварии (II и III стадии). — Атомная энергия, 2007, т. 103, вып. 5, с. 286—291.
2. Алексеев А.В., Горячев А.В., Калыгин В.В. и др. Испытания в реакторе МИР топлива ВВЭР-1000 в условиях, моделирующих II и III стадии проектной аварии «Большая течь». — Изв. вузов. Ядерная энергетика, 2009, № 4, с. 132—136.
3. Алексеев А.В., Бурукин А.В., Ижutow А.Л. и др. Программы и методы испытаний в исследовательском реакторе МИР твэлов водоохлаждаемых реакторов в условиях, моделирующих переходные и аварийные режимы. — Атомная энергия, 2012, т. 113, вып. 3, с. 146—150.
4. Fedotov P.V., Kumachev A.V., Kuznetsov V.I. e.a. LOCA test with high burnup VVER fuel in MIR reactor. — In: Proc. Conf. TopFuel. P. II. Switzerland, 13—17 September 2015, с. 391—400.
5. Алексеев А.В., Горячев А.В., Дреганов О.И. и др. Изучение поведения твэлов ВВЭР-1000 в условиях аварии с потерей теплоносителя (LOCA). Реакторные эксперименты МИР-LOCA/45 и МИР-LOCA/69. — В сб.: Научно-технич. конф. «Ядерное топливо для АЭС». Москва, 16—17 ноября 2016 г., с. 38.
6. Гончаров А.А., Кузнецов В.И., Кумачев А.В. и др. Экспериментальные и расчетные исследования поведения топлива ВВЭР высокого выгорания в проектных авариях. — Там же, с. 36.

Поступила в Редакцию 6.02.17