

ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ОБОЛОЧКИ ТВЭЛА С ВЫГОРЕВШИМ ТОПЛИВОМ В ДИАПАЗОНЕ 500 – 900°C В РЕАКТОРНОМ ЭКСПЕРИМЕНТЕ

О.И. Дреганов, В.Н. Шулимов, И.В. Киселева, А.В. Алексеев

АО «ГНЦ – Научно-исследовательский институт атомных реакторов»

Россия, 433510, Ульяновская область, г. Димитровград, Западное шоссе, д. 9



Работа посвящена проблеме измерения температуры оболочки твэла ВВЭР-1000 с выгоревшим топливом в диапазоне 500 – 900°C при проведении экспериментов в канале исследовательского реактора МИР для получения данных о поведении твэлов при воздействии параметров, характерных для максимальной проектной аварии с потерей теплоносителя (ЛОСА). При изучении характера деформирования оболочки выгоревшего твэла необходимо обеспечить измерение температуры оболочки без какого-либо воздействия (термического, механического и др.) на оболочку в области максимальной деформации. Для динамических экспериментов в канале реактора МИР с испытанием твэлов в парогазовой среде был разработан узел измерения температуры оболочки, в котором в области максимальной деформации она не подвергается внешним воздействиям. Рабочий спай ТЭП прижимается к оболочке при установке в дистанционирующую решетку, что позволяет избежать внешнего воздействия на оболочку. Термометрическую характеристику узла крепления ТЭП, которая связана с влиянием самой решетки на его тепловое состояние, изучали на лабораторной установке. Способ нашел применение в реакторных экспериментах, в которых изучался характер деформирования оболочки твэла.

Ключевые слова: лабораторная установка (ЛУ), экспериментальный твэл (ЭТ), электрообогреваемый имитатор твэла (ЭИТ), оболочка, дистанционирующая решетка (ДР), термоэлектрический преобразователь (ТЭП), рабочий спай, температура, скорость разогрева, реактор МИР, авария с потерей теплоносителя (ЛОСА).

ВВЕДЕНИЕ

При изучении поведения твэлов ВВЭР-1000 в условиях нормальной эксплуатации и отклонений от режима нормальной эксплуатации существует целый класс реакторных экспериментов [1 – 4], в которых изучаемый объект должен испытываться в строго определенном температурном интервале. Особенно это относится к испытанию твэлов в режиме аварии с потерей теплоносителя (ЛОСА) [5 – 8], в которых температура оболочки реализуется в диапазоне от 700 до 900°C для различных экспериментов с погрешностью, не превышающей 2 – 5%. При превышении этой величины может возникать дополнительный фактор влияния на изучаемое свойство, который не может быть учтен

© **О.И. Дреганов, В.Н. Шулимов, И.В. Киселева, А.В. Алексеев, 2017**

при интерпретации результатов эксперимента.

При проведении таких экспериментов необходимо знать температуру оболочки в любой момент времени с достаточной точностью для интерпретации результатов.

Расчетное определение температуры в подобных экспериментах [9] не приводит к положительному результату, так как существующие неравномерности энерговыделения в канале исследовательского реактора и сложный характер теплообмена в парогазовой среде, в которой проводится испытание объекта в режиме LOCA, не позволяют получить приемлемую точность расчета. Единственным способом определения температуры являются измерения в режиме реального времени. Речь идет об измерении температуры оболочки твэлов ВВЭР-1000 с выгоревшим топливом, так как испытания твэлов со свежим топливом не представляют практического интереса.

ПРИМЕНЯЕМЫЕ В РЕАКТОРНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТАХ СПОСОБЫ КРЕПЛЕНИЯ ТЭП НА ОБОЛОЧКУ ВЫГОРЕВШЕГО ТВЭЛА

В литературе имеются сведения о двух способах установки рабочего спая на оболочку облученного твэла – с помощью точечной сварки, выполняемой дистанционно в защитной камере [10], и с помощью специального хомута [11], который также устанавливается дистанционно. Первый способ применялся при проведении экспериментов в канале реактора Halden, второй способ крепления рабочего спая ТЭП был реализован в экспериментах, проводимых в защитной камере.

Отмеченные выше способы крепления ТЭП на оболочку облученного твэла выполняются дистанционно и сложны для реализации. К тому же не для каждого реактора они могут быть технически выполнены. Определенные проблемы возникают при монтаже линий связи датчик - вторичный прибор. Для каналов исследовательского реактора МИР [12] в силу конструктивных особенностей это технически невыполнимо.

Если же в перечень основных изучаемых свойств входит характер деформирования оболочки твэла, то существенным недостатком указанных способов является сам принцип крепления, поскольку оболочка подвергается механическому и термическому воздействиям, которые могут повлиять на характер процесса и абсолютную величину деформации.

УЗЕЛ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ОБОЛОЧКИ ВЫГОРЕВШЕГО ТВЭЛА ДЛЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ В КАНАЛЕ РЕАКТОРА МИР

Для динамических экспериментов в канале реактора МИР [13 – 18], где испытания изучаемого объекта проводятся в парогазовой среде, был разработан термометрический узел измерения температуры облученной оболочки твэла, в котором оболочка в области максимальной деформации не подвергается внешним воздействиям. К таким экспериментам относятся испытания твэлов ВВЭР-1000 в режиме LOCA.

Отличительной особенностью разработанного метода является установка ТЭП в дистанционирующую решетку специальной конструкции таким образом, что при дистанционной загрузке облученного твэла в устройство рабочий спай ТЭП автоматически прижимается к оболочке твэла. Значимым преимуществом такого крепления является исключение из технологического процесса сборки изделия операции, выполняемой дистанционно. Установка ТЭП и монтаж линий связи ТЭП - вторичный прибор выполняется на стапеле изготовителя.

Крепление твэла с длиной топливного сердечника 1000 мм в устройстве для проведения экспериментов LOCA осуществляется с помощью дистанционирующих решеток (ДР), которые расположены с шагом 200 мм. Рабочий спай ТЭП может быть расположен как внутри ДР, так и на расстоянии 5 – 7 мм от верх-

него торца ДР. В обоих вариантах прижатие рабочего спая ТЭП к оболочке твэла обеспечено конструкцией узла крепления ТЭП.

ЛАБОРАТОРНАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕРМОМЕТРИЧЕСКОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ УЗЛА КРЕПЛЕНИЯ ТЭП К ОБОЛОЧКЕ ВЫГОРЕВШЕГО ТВЭЛА

Развитая поверхность ДР и заметная потеря тепла с этой поверхности в окружающее пространство приводят к значительному влиянию ДР на аксиальное распределение температуры оболочки твэла. Особенно заметно это влияние проявляется при проведении динамических экспериментов. Без знания количественного влияния ДР на распределение температуры оболочки и системы поправок для определения температуры оболочки между решетками такой способ установки ТЭП в устройствах, предназначенных для проведения экспериментов в каналах исследовательских реакторов, не применим. Очевидно, что термометрические характеристики узла с различным расположением рабочего спая ТЭП будут отличаться друг от друга. Поэтому поправки на показания ТЭП в ДР должны определяться для каждого варианта отдельно. Эти поправки определялись экспериментальным путем с использованием лабораторной установки, которая являлась точной копией активной части устройства для проведения реакторных динамических экспериментов с моделированием в испытательном канале параметров аварии LOCA на ВВЭР-1000. Источником теплового потока в установке был имитатор твэла с внутренним электронагревательным элементом.

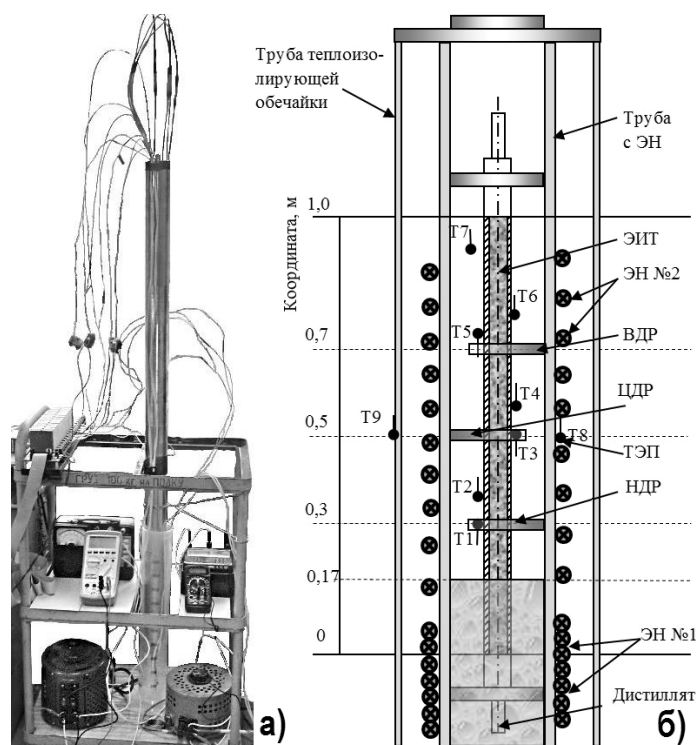


Рис. 1. Лабораторная установка: а) – общий вид; б) – схема расположения ДР и ТЭП в УУ

На рисунке 1 показаны общий вид лабораторной установки и схема центральной части устройства с указанием расположения дистанционирующих решеток (ДР) и ТЭП. Электронагреватели (ЭН) на боковой поверхности чехловой трубы установлены в устройстве для создания внешних температурных условий на твэле, характерных при ра-

боте в составе многоэлементной ТВС.

В центральной части лабораторной установки (объем с ЭИТ) установлены ТЭП

– в трех дистанционирующих решетках (T_1 , T_3 , T_5), к показаниям которых предстоит определить поправки;

– на оболочке ЭИТ в трех точках по высоте (T_2 , T_4 , T_6), которые не имеют связи с ДР; координаты установки рабочих спаев ТЭП на оболочке находятся выше ДР;

– на чехловых трубах и в теплоносителе.

Места установки ТЭП показаны на рис. 16. Рабочий спай ТЭП в верхней решетке (ВДР) расположен на расстоянии 5 – 7 мм от верхнего торца ДР, а в центральной (ЦДР) и нижней (НДР) решетках – внутри ДР.

ТЭП к оболочке ЭИТ прикреплялась с помощью проволочного бандажа. Все ТЭП были подключены к информационно-измерительной системе (ИИС) с частотой регистрации показаний 1 Гц. Для измерения температуры как на лабораторном стенде, так и в реакторных экспериментах использовались кабельные ТЭП второго класса допуска с типом термопары хромель-алюмель (ТХА), диаметром стальной (12Х18Н10Т) оболочки 1,5 мм, изоляцией из оксида магния, с совместным рабочим спаем термоэлектродов диаметром 0,27 мм. Все ТЭП перед экспериментами были аттестованы по ГОСТ Р 8.585-2001, для которых величина поправки находится в диапазоне от $-0,7$ до $-1,5^{\circ}\text{C}$. При аттестации ТЭП в поправке учтены термоэлектрическая неоднородность, а также связь датчика температуры со вторичным прибором – преобразователем сигнала. Постоянная времени для ТЭП не более 0,500 с.

На рисунке 2 показаны места крепления ТЭП к оболочке ЭИТ.

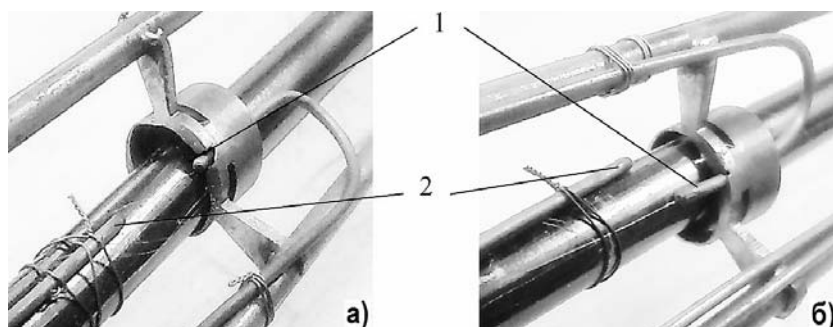


Рис. 2. Места установки рабочего спаев ТЭП: а) – в плоскости ДР; б) – выше плоскости ДР на 7 мм; ТЭП, прижатые к оболочке ДР (1); ТЭП, прижатые к оболочке бандажом (2)

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОПРАВОК К ПОКАЗАНИЯМ ТЭП

Величина поправок к показаниям ТЭП, расположенных в ДР ($T_2 - T_1$, $T_4 - T_3$, $T_6 - T_5$), зависит от температуры узла крепления ТЭП и величины теплового потока с оболочки ЭИТ (скорости разогрева оболочки) в зоне расположения ДР. Поэтому в процессе эксперимента варьировалась мощность ЭИТ.

Укажем параметры двух режимов разогрева ЭИТ с минимальной и максимальной скоростями нагрева, которые можно получить на данном оборудовании. Отметим, что максимальная скорость нагрева соответствует значению, которое задается в реакторном эксперименте.

Режим 1 – включены ЭН №1 и №2 (мощность каждого нагревателя по 350 Вт), мощность ЭИТ увеличивается ступенями 16, 62, 135, 235, 377, 545 Вт.

Режим 2 – включены ЭН №1 – 340 Вт и ЭН №2 – 300 Вт, скачкообразное увеличение мощности ЭИТ за две ступени 790, 900 Вт с промежуточным охлаждением оболочки ЭИТ до 500°C .

Во всех режимах разогрева ЭИТ при переходе к последующей ступени повышения мощности делалась выдержка времени для достижения стационарного теплового состояния.

В таблице 1 приведены значения разности показаний ТЭП для каждой ДР и скорость роста показаний ТЭП, связанные друг с другом. Оба параметра определялись в эксперименте в режиме реального времени.

Таблица 1

Значения разностей температур $T_2 - T_1$, $T_4 - T_3$, $T_6 - T_5$ и скоростей роста показаний ТЭП

Область НДР			Область ЦДР			Область ВДР		
$T_2 - T_1$, °C	Скорость, °C/c		$T_4 - T_3$, °C	Скорость, °C/c		$T_6 - T_5$, °C	Скорость, °C/c	
	в НДР	над НДР		в ЦДР	над ЦДР		в ВДР	над ВДР
Режим 1								
72	0,22	0,43	30	0,29	0,46	13	0,37	0,48
83	0,34	0,57	33	0,39	0,57	13	0,5	0,62
79	0,29	0,51	27	0,4	0,55	15	0,45	0,6
84	0,41	0,7	25	0,54	0,75	18	0,64	0,83
Режим 2								
166	1,96	3,24	96	2,8	3,84	22	2,97	3,2
90	1,38	2,77	50	1,78	3	8	0,91	0,78

Наибольшее влияние на показания ТЭП решетки оказывала в том случае, если рабочий спай находился внутри ДР (рис. 2а), как имело место в НДР и ЦДР. В этом случае разница между показаниями ТЭП в ДР и на оболочке ЭИТ может достигать более 100°C при высоких скоростях нагрева ЭИТ (более 3°C/c). Если ТЭП имеет связь с ДР, но рабочий спай находится за ее пределами (рис. 2б), влияние решетки значительно меньше. В этом случае для всех режимов разница между показаниями ТЭП в ДР и на оболочке ЭИТ не превышала 30°C. В эксперименте на лабораторной установке определено количественное влияние ДР в каждом варианте установки ТЭП.

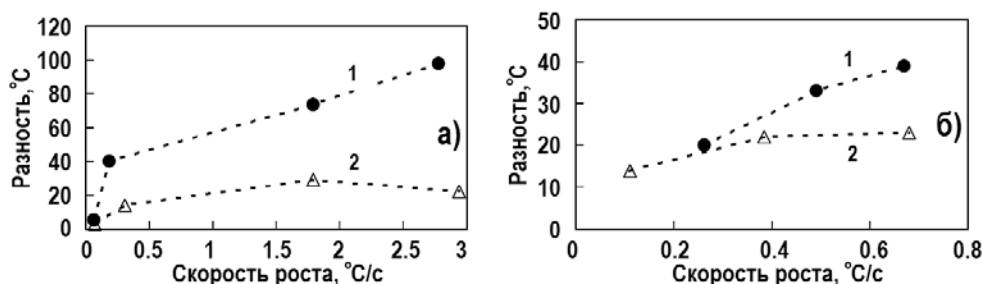


Рис. 3. Изменение величины разности показаний ТЭП $T_4 - T_3$, $T_6 - T_5$ от скорости роста показаний ТЭП в ЦДР (1) и ВДР (2) при температуре 300°C (а) и 600°C (б)

На рисунке 3 показаны зависимости величины разности между показаниями ТЭП в ДР и ТЭП на оболочке ЭИТ от скорости роста для двух схем расположения рабочего спая – внутри ДР (для ЦДР) и на расстоянии около 5 – 7 мм (для ВДР).

В соответствии с данными рис. 3 и табл. 1 вариант расположения рабочего спая ТЭП выше плоскости ДР более предпочтителен, так как поправки к показаниям ТЭП в этом случае меньше.

Значения поправок к показаниям ТЭП при установке рабочего спая

- внутри дистанционной решетки 80 – 100°C для скорости роста показаний ТЭП в диапазоне 2,0 – 3,0°C/с;
- выше плоскости решетки (на 5 – 7 мм) 20 – 30°C для скорости роста по ТЭП в диапазоне 0,5 – 3,0 С/с.

ПРИМЕНЕНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ ПРИ РАСЧЕТНОМ МОДЕЛИРОВАНИИ ПАРАМЕТРОВ РЕАКТОРНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Полученные результаты были использованы при определении температуры оболочки твэла с глубоким выгоранием топлива в реакторных экспериментах [13 – 18] в каналах исследовательского реактора МИР, в которых были реализованы параметры аварии с потерей теплоносителя на ВВЭР-1000 [19 – 20]. Экспериментальные результаты в реакторных экспериментах хорошо коррелировали с данными посттестовых исследований испытанных твэлов и были подтверждены при расчетном моделировании данных.

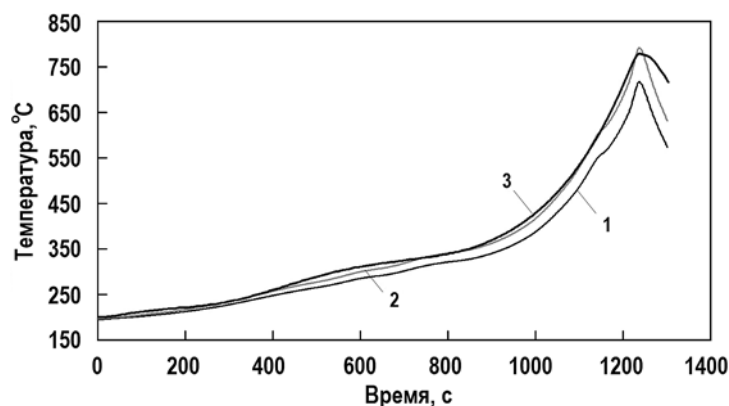


Рис. 4. Изменение во времени температуры в эксперименте 1: показания ТЭП (1); значения температуры оболочки, определенные по показаниям ТЭП с учетом поправок (2); расчетные значения температуры оболочки (3)

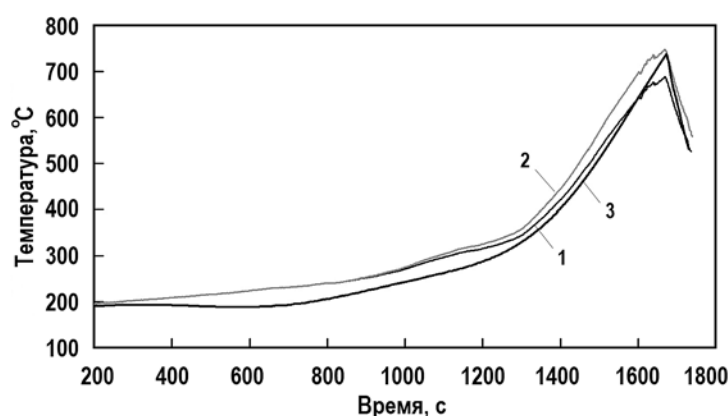


Рис. 5. Изменение во времени температуры в эксперименте 2: показания ТЭП (1); значения температуры оболочки, определенные по показаниям ТЭП с учетом поправок (2); расчетные значения температуры оболочки (3)

На рисунках 4, 5 приведены результаты двух экспериментов [15 – 17]: первый – максимальная температура оболочки 805°C, второй – максимальная температура оболочки 760°C. Приведены также результаты расчетного моделирования па-

раметров, полученные для ЦДР, которая расположена в области максимального энерговыделения.

Высотная координата, на которой достигнута максимальная температура оболочки, совпадает с координатой максимальной окружной деформации, измеренной в защитной камере.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрены методические аспекты измерения температуры оболочки твэлов с выгоревшим топливом, успешно внедренные в практику проведения экспериментов в каналах реактора МИР, в которых одним из основных изучаемых параметров является деформация оболочки в области температур 700 – 900°C.

Приведены результаты изучения термометрической характеристики узла крепления ТЭП в дистанционирующую решетку. На лабораторной установке, в которой использовался имитатор твэла с внутренним электронагревом, определена система поправок для определения температуры оболочки.

Достоверность результатов определения температуры оболочки выгоревшего твэла подтверждена результатами послереакторных исследований и результатами расчетного моделирования экспериментальных данных.

Литература

1. Алексеев А.В., Бурукин А.В., Ижutow А.Л. и др. Методы испытаний в реакторе МИР топлива ВВЭР при переходных и аварийных режимах // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2007. – № 3. – С. 83-91.
2. Алексеев А.В., Киселева И.В., Малков А.П., Шулимов В.Н. Изучение поведения твэлов ВВЭР в условиях аварии с выбросом регулирующего органа. Методика и технология внутриреакторного эксперимента. // Сборник трудов НИИЯР. – 2006. – Вып. 1. – С. 23-32.
3. Алексеев А.В., Киселева И.В., Овчинников В.А., Шулимов В.Н. Методика испытания в реакторе МИР топлива ВВЭР-1000 в условиях аварии с выбросом регулирующего органа. // Атомная энергия. – 2006. – Т. 101. – Вып. 6. – С. 427-431.
4. 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.
5. Горячев А.В., Махин В.М., Киселева И.В., Шулимов В.Н. Интегральные реакторные эксперименты по испытанию многоэлементных фрагментов ТВС ВВЭР-440 и ВВЭР-1000 при параметрах аварии с потерей теплоносителя. Обобщение результатов по циклу экспериментов. // ВАНТ. Сер.: Физика ядерных реакторов. – 2004. – Вып. 2. – С. 29-38.
6. Алексеев А.В., Горячев А.В., Калыгин В.В., Киселева И.В., Шулимов В.Н. Испытания в реакторе МИР топлива ВВЭР-1000 в условиях, моделирующих II и III стадии проектной аварии «Большая течь». // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2009. – № 4. – С. 132-136.
7. Салатов А.В., Кумачев А.В., Нечаева О.А. и др. Экспериментальные и расчетные исследования поведения твэлов ВВЭР в условиях ЛОСА (эксперимент МИР-ЛОСА/60). // ВАНТ. Сер.: Материаловедение и новые материалы. – 2013. – Т. 74. – Вып. 1. – С. 26-38.
8. Горячев А.В., Киселева И.В., Махин В.М., Шулимов В.Н. Интегральные реакторные эксперименты по испытанию многоэлементных фрагментов ТВС ВВЭР-440 и ВВЭР-1000 при параметрах аварии с потерей теплоносителя. // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2004. – № 3. – С. 50-58.
9. Шулимов В.Н., Киселева И.В. Расчетно-экспериментальное определение температуры твэлов в динамическом интегральном реакторном эксперименте «Большая течь-2» (БТ-2). Оценка экспериментальных данных и верификация расчетных кодов. / Тез. докл. научно-технического семинара 4 – 8 окт. 2004 г. – Сосновый Бор: НИТИ им. А.П.Александрова, 2004. – С. 98-100.
10. Askeljung P., Flygare J., Minghetti D. Studsvik Nuclear AB, SE-611 82, Nyköping, Sweden.

NRC LOCA testing program at Studsvik, recent results on high burnup fuel (TopFuel 2012-a0117).

11. *Kekkonen Laura* LOCA testing at Halden. In-pile results from the VVER LOCA test IFA-650.6 (HWR-870). EHPG Meeting, 18-23 May 2008, Loen.

12. Исследовательские реакторы НИИАР и их экспериментальные возможности. / Под научн. ред. проф. В.А. Цыканова. – Дмитровград: НИИАР, 1991. – 103с.

13. *Shulimov V.N., Dreganov O.I., Izhutov A.L. et al.* LOCA test with high burnup VVER fuel in MIR reactor. TopFuel conference Proceedings Part II, Zurich, Switzerland, 13-17 September 2015. ISBN 978-92-95064-23-2, www.topfuel2015.org. – PP. 391-400.

14. *Izhutov A.L., Dreganov O.I., Kisseleva I.V., Shulimov V.N.* Researches of VVER high burn-up fuel behavior under LOCA conditions. Joint Halden Reactor Project NEA Working Group on Fuel safety LOCA Workshop. Aix-en Provence, France, May 20-21, 2015.

15. *Алексеев А.В., Горячев А.В., Дреганов О.И. и др.* Изучение поведения твэлов ВВЭР-1000 в условиях аварии с потерей теплоносителя (ЛОСА). Реакторные эксперименты МИР-ЛОСА/45 и МИР-ЛОСА/69. / В сб. научно-технич. конф. АО «ТВЭЛ» «Ядерное топливо нового поколения для АЭС». – Москва, 16-17 ноября 2016. – С. 38.

16. *Гончаров А.А., Кузнецов В.И., Кумачев А.В. и др.* Экспериментальные и расчетные исследования поведения топлива ВВЭР высокого выгорания в проектных авариях. / В сб.: научно-технич. конф. АО «ТВЭЛ» «Ядерное топливо нового поколения для АЭС». Москва, 16-17 ноября 2016. – С. 36.

17. *Алексеев А.В., Горячев А.В., Дреганов О.И., Киреева Л.В., Киселева И.В., Шулимов В.Н.* Изучение поведения твэлов ВВЭР-1000 в условиях аварии с потерей теплоносителя (ЛОСА). Сб. трудов АО «ГНЦ НИИАР» – Дмитровград: АО «ГНЦ НИИАР», 2017. Вып. 1. С. 12-20. ISBN 978-5-94831-154-8.

18. *Алексеев А.В., Горячев А.В., Дреганов О.И., Киреева Л.В., Киселева И.В., Шулимов В.Н.* Изучение поведения твэлов ВВЭР-1000 с глубоким выгоранием топлива в условиях аварии с потерей теплоносителя (ЛОСА) в эксперименте МИР-ЛОСА/72. / Сб. тез. докл. X Межд. научно-техн. конф. «Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР», 16-19 мая 2017г. – Россия, Подольск. – С. 102-103. ISBN 978-94883-146-6.

19. *Спассков В.П., Шумский А.М., Семишкин В.П.* Реакторные исследования аварийного поведения активной зоны ВВЭР на петлевой установке ПВП-2 реактора МИР. / – В сб. трудов Межд. конф. «Теплофизические аспекты безопасности ВВЭР (Теплофизика-98)». – Обнинск: ГНЦ РФ-ФЭИ, 1998. – Т. 2. – С. 42-51.

20. *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 МПА (II и III стадии). // Атомная энергия. – 2007. – Т. 103. – Вып. 5. – С. 286-291.

Поступила в редакцию 26.07.2017 г.

Авторы

Дреганов Олег Игоревич, научный сотрудник

E-mail: sokratik9@yandex.ru

Шулимов Виталий Николаевич, ведущий научный сотрудник, канд. техн. наук

E-mail: lataiska@mail.ru

Киселёва Ирина Владимировна, ведущий научный сотрудник, канд. техн. наук

E-mail: kis65@rambler.ru

Алексеев Александр Вениаминович, старший научный сотрудник, канд. техн. наук

E-mail: radugka2@mail.ru

MEASUREMENT OF THE SPENT FUEL ROD CLADDING TEMPERATURE DURING THE IN-PILE TESTING AT 500 – 900°C

Dreganov O.I., Shulimov V.N., Kiseleva I.V., Alekseev A.V.

JSC «State Scientific Center – Research Institute of Atomic Reactors»

9 Zapadnoye shosse, Ulyanovsk reg., Dimitrovgrad, 433510 Russia

ABSTRACT

The paper focuses on the measurement of the VVER-1000 spent fuel rod cladding temperature in the course of the in-pile testing performed at 500-900°C in the MIR reactor channel to obtain data on the fuel rods behavior under the parameters typical for the maximal design-basis loss-of-coolant accident (LOCA). If the objective is to study the cladding deformation of spent fuel rod, it is very important to take measurements of cladding temperature with no any impact (thermal, mechanical etc.) on it in the region of the maximum straining.

To conduct rapid experiments in the MIR reactor channels where irradiation testing of fuel rods is performed in the vapor-gas medium, a cladding temperature measurement system was developed so that the cladding was not exposed to external influences in the region of the maximum straining.

The thermocouple hot junction is pressed to the cladding when installed into the spacer grid to avoid the external influence on the cladding. A lab-scale facility was used to study the thermometric characteristic of the thermocouple junction unit that is related to the influence of the spacer grid on the unit thermal state. The laboratory-scale experiment with the use of dummy fuel rod instrumented with the internal electrical heater made it possible to obtain error correction system for readings of thermocouples which were installed into the spacer grids to take temperature recordings in the region of the maximum straining of fuel cladding.

The procedure was applied in the in-pile experiments to study the fuel rod cladding deformation. The obtained experimental data were used to estimate the cladding temperature for the high burnup fuel rod to conduct irradiation testing in the MIR reactor under the conditions of maximum design-basis LOCA in the VVER-1000 reactor. These data were in good agreement with the post-irradiation examination data of fuel rods and were confirmed with the calculation modelling.

Key words: lab-scale facility, experimental fuel rod, electrically heated fuel rod dummy, cladding, spacer grid, thermocouple, hot junction, temperature, heating rate, reactor MIR, loss-of-coolant accident (LOCA).

REFERENCES

1. Alekseev A.V., Burukin A.V., Izhutov A.L., Kalygin V.V., Kiseleva I.V., Ovchinnikov V.A., Shulimov V.N. Methods to test VVER fuel in the MIR reactor under transient and accidental conditions. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*, 2007, no. 3, pp.83-91 (in Russian).
2. Alekseev A.V., Kiseleva I.V., Malkov A.P., Shulimov V.N. Studying of the VVER fuel behavior under the control rod ejection accident conditions. In-pile test method and procedure. *Sbornik Trudov NIIAR [RIAR Proceedings]*, 2006, iss. 1, pp. 23-32 (in Russian).
3. Alekseev A.V., Kiseleva I.V., Ovchinnikov V.A., Shulimov V.N. VVER-1000 fuel testing method in the MIR reactor under the control rod ejection accident conditions. *Atomnaya Energiya*, 2006, v.101, iss. 6, pp. 427-431 (in Russian).
4. Alekseev A.V., Burukin A.V., Izhutov A.L., Kalygin V.V., Kiseleva I.V., Ovchinnikov V.A., Shulimov V.N. Programs and Methods for Testing in the MIR research Reactor Fuel Elements of

Water-Cooled Reactors under Conditions Simulating Transient and Emergency Ones. *Atomnaya Energiya*, 2012 (September), v. 113, iss. 3, pp. 146-150 (in Russian).

5. Goryachev A.V., Makhin V.M., Kiseleva I.V., Shulimov V.N. Integral In-Pile Experiments with VVER-440 and VVER-1000 Multielement Fuel Test Rigs under the LOCA Conditions. Compilation of Experimental Data from a series of Tests. *VANT. Ser. Fizika Yadernykh Reaktorov*, 2004, iss. 2, pp. 29-38 (in Russian).

6. Alekseev A.V., Goryachev A.V., Kalygin V.V., Kiseleva I.V., Shulimov V.N. VVER-1000 Fuel Irradiation in the MIR Reactor under Conditions Simulating II and III Stage of Design Basis "Large Leak" Accident. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*. 2009, no. 4, pp. 132-136 (in Russian).

7. Salatov A.V., Kumachev A.V., Nechaeva O.A., Novikov V.V., Fedotov P.V., Alekseev A.V., Goryachev A.V., Kiseleva I.V., Shulimov V.N., Bykov M.A., Makhin V.M., Zaytsev S.I., Zakutaev M.O., Lyutov K.V., Pylev S.S., Tebin V.V., Shchepetilnikov E.Yu., Gusev A.S., Pimenov Yu.V. Experimental and Computational Studies of VVER Fuel Behavior under LOCA Conditions (MIR-LOCA/60 Test). *VANT. Ser. Materialovedenie i Novye Materialy*, 2013, iss. 1 (74), pp. 26-38 (in Russian).

8. Goryachev A.V., Kiseleva I.V., Makhin V.M., Shulimov V.N. Integral In-Pile Experiments with VVER-440 and VVER-1000 Multielement Fuel Test Rigs under the LOCA Conditions. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*. 2004, no. 3, pp. 50-58 (in Russian).

9. Shulimov V.N., Kiseleva I.V. Experiment- and Calculation-Based Estimation of Fuel in the Course of Rapid In-Pile «Large Break Loss of Coolant Accident-2» (BT-2). «Experimental Data Analysis and Verification of Computer Codes». Proc. of Workshop Abstracts. Sosnovy Bor, October 4-8, 2004. Nauchno-Issledovatel'skiy Tekhnologicheskii Institut im. A.P. Aleksandrova [Research Institute of Technology n.a. A.P. Alexandrov], pp. 98-100 (in Russian).

10. Askeljung P., Flygare J., Minghetti D. Studsvik Nuclear AB, SE-611 82, Nyköping, Sweden NRC LOCA testing program at Studsvik, recent results on high burnup fuel (TopFuel 2012-a0117).

11. Kekkonen L. LOCA testing at Halden. In-pile results from the VVER LOCA test IFA-650.6 (HWR-870). EHPG Meeting, 18-23 May 2008, Loen.

12. *Research Reactors of RIAR and their Experimental Capabilities* under Scientific Editorship of Prof. V.A. Tsykanov. Dimitrovgrad. NIIAR Publ., 1991, 103 p. (in Russian).

13. Shulimov V.N., Dreganov O.I., Izhutov A.L., Kiseleva I.V., Goryachev A.V., Alexeev A.V., Fedotov P.V., Kumachev A.V., Kuznetsov V.I., Novikov V.V., Salatov A.V., Sypchenko M.V., Pimenov Yu.V. LOCA test with high burnup VVER fuel in MIR reactor. TopFuel conference Proceedings Part II, Zurich, Switzerland, 13-17 September 2015. ISBN 978-92-95064-23-2, www.topfuel2015.org., pp. 391-400.

14. Izhutov A.L., Dreganov O.I., Kiseleva I.V., Shulimov V.N. Researches of VVER high burn-up fuel behavior under LOCA conditions. Joint Halden Reactor Project NEA Working Group on Fuel safety LOCA Workshop. Aix-en-Provence, France, May 20-21, 2015.

15. Alekseev A.V., Goryachev A.V., Dreganov O.I., Izhutov A.L., Kireeva L.V., Kiseleva I.V., Shulimov V.N., Kuznetsov V.I., Novikov V.V., Salatov A.V., Fedotov P.V. Investigation of VVER-1000 fuel rods behavior under LOCA. MIR-LOCA/45 and MIR-LOCA/69 experiments. Proc. of JSC «TVEL» Scientific Conference «Yadernoye toplivo novogo pokoleniya dlya AES» [New Generation Nuclear Fuel for NPPs]. Moscow, 16-17 November 2016, p. 38 (in Russian).

16. Goncharov A.A., Kuznetsov V.I., Kumachev A.V., Nechaeva O.A., Novikov V.V., Salatov A.V., Fedotov P.V. Experiments and calculation to study high-burnup VVER fuel behavior under design-basis accidents. Proc. of JSC «TVEL» Scientific Conference «Yadernoye toplivo novogo pokoleniya dlya AES» [New Generation Nuclear Fuel for NPPs]. Moscow, 16-17 November 2016, p. 36. (in Russian).

17. Alekseev A.V., Goryachev A.V., Dreganov O.I., Kireeva L.V., Kiseleva I.V., Shulimov V.N.

Study of VVER-1000 Fuel Rod Behavior under LOCA Conditions. Sbornik Trudov NIIAR [RIAR Proceedings]. Dimitrovgrad. AO «GNTs NIIAR» [JSC «SSC RIAR»], 2017, iss. 1, pp. 12-20. ISBN 978-5-94831-154-8 (in Russian).

18. Alekseev A.V., Goryachev A.V., Dreganov O.I., Kireeva L.V., Kiseleva I.V., and Shulimov V.N. Study of high-burnup VVER-1000 Fuel Rod Behavior under LOCA Conditions. Experiment-LOCA/72. Proc. of the Xth International Scientific and Technical Conference «Safety Assurance of NPP with VVER», 16-19 May, 2017. Russia. Podolsk, pp. 102-103. ISBN 978-94883-146-6 (in Russian).

19. Spasskov V.P., Shumsky A.M., Semishkin V.P. In-Pile Testing of the VVER Core Emergency Performance in the Loop Test Facility PVP-2 in the MIR reactor. Proc. of Int. Conf. «Thermal Physics-98», Obrninsk. SSC RF-IPPE, 1998, v. 2, pp. 42-51 (in Russian).

20. Alekseev A.V., Goryachev A.V., Kiseleva I.V., Shulimov V.N. Procedure and results of testing a VVER-1000 FA fragment in the MIR reactor channel under the maximum design-basis accident (stages II and III). *Atomnaya Energiya*, 2007 (November), v. 103, iss. 5, pp. 286-291 (in Russian)

Authors

Dreganov Oleg Igorevich, Researcher

E-mail: sokratik9@yandex.ru

Shulimov Vitalij Nikolaevich, Leading Researcher, Cand. Sci. (Engineering)

E-mail: lataiska@mail.ru

Kiselyova Irina Vladimirovna, Leading Researcher, Cand. Sci. (Engineering)

E-mail: kis65@rambler.ru

Alekseev Aleksandr Veniaminovich, senior researcher, Cand. Sci. (Engineering)

E-mail: radugka2@mail.ru