

## РАЗРАБОТКА ИНЖЕНЕРНОГО МЕТОДА РАСЧЕТА ХАРАКТЕРИСТИК ПОВТОРНОГО ЗАЛИВА ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ПРОЕКТНЫХ АВАРИЙ

С. С. Базюк<sup>1</sup>, Н. Я. Паршин<sup>1</sup>, Е. Б. Попов<sup>1</sup>, Ю. А. Кузма – Кичта<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ФГУП “Научно-исследовательский институт Научно-производственное объединение “ЛУЧ”, 142100, г. Подольск, ул. Железнодорожная, 24, e-mail: [bazukss@inbox.ru](mailto:bazukss@inbox.ru)

<sup>2</sup>ФГБОУ ВПО “Национальный исследовательский университет МЭИ”  
111250, г. Москва, ул. Красноказарменная, 14, e-mail: [kuzma@itf.mpei.ac.ru](mailto:kuzma@itf.mpei.ac.ru)

Предложен инженерный метод расчета основных характеристик расхолаживания при повторном заливе снизу модельных ТВС ВВЭР и PWR различной масштабности в условиях МПА, удовлетворительно описывающая опытные данные, полученные на стенде ПАРАМЕТР в диапазоне температур до 1200 °С. Методика позволяет рассчитывать параметры залива не только модельных тепловыделяющих сборок при имитации аварийных ситуаций, но и оценивать расход воды и время, необходимые для залива активных зон энергоблоков при возникновении аварии, не связанной с разрывом трубопровода (типа Фукусима Даи-ичи).

### Введение

В мире произошли около тридцати малых и три крупных аварии на АЭС: Три Майл Айленд (28.03.1979), Чернобыльская (26.04.1986) и Фукусима Даи-ичи (11.03.2011). Поэтому в настоящее время во всем мире уделяется повышенное внимание предупреждению аварий и проводится детальный анализ безопасности атомных станций при проектировании и эксплуатации. Наиболее тяжелым по последствиям для населения и окружающей среды являются аварии с потерей теплоносителя, подразделяющиеся на максимальные проектные (МПА) и запроектные (ЗПА).

Исследования сценариев развития МПА и ЗПА реакторов ВВЭР и PWR проводились на стендах CODEX [1], СВД [2], QUENCH [3] и ПАРАМЕТР [4] с моделированием внутреннего тепловыделения в твэлах. В экспериментах изучалось термомеханическое поведение твэлов (окисление, раздутие и разгерметизация оболочек), топливных таблеток (растрескивание, плавление, взаимодействие с циркониевым сплавом). Однако процесс расхолаживания твэлов модельных тепловыделяющих сборок при подаче воды детально не анализировался.

Имеющиеся данные по характеристикам повторного залива модельных тепловыделяющих сборок ВВЭР из штатных конструктивных элементов при заливе снизу и сверху крайне ограничены, а в условиях разгерметизации и раздутия окисленных оболочек – практически отсутствуют. Существующие расчетные коды описывают процессы расхолаживания (рис. 1), но они сложны, дорогостоящие и в ряде случаев дают значительные расхождения с экспериментом,

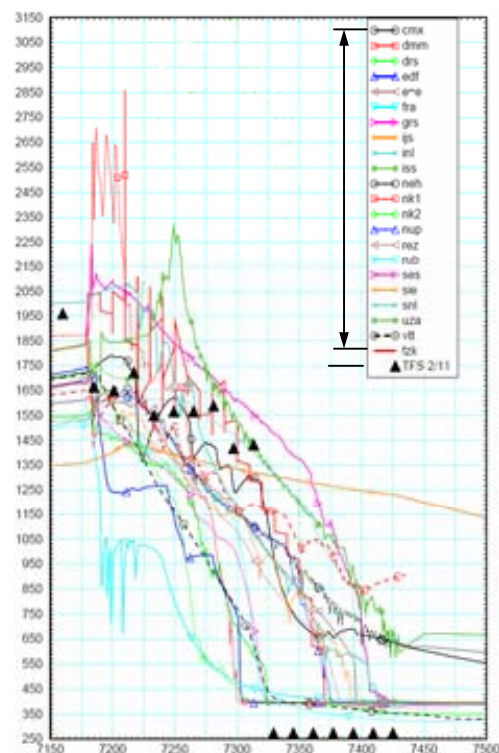


Рис. 1. Сопоставление расчетных данных по различным теплогидравлическим кодам и эксперимента (▲) QUENCH-6 (стандартная проблема ISP-36) [3]

поэтому целесообразно разрабатывать приближенные методы расчета основных характеристик охлаждения ТВС при максимальной проектной и запроектной авариях. На решение этих задач направлено исследование повторного залива модельных ТВС ВВЭР и PWR при МПА и ЗПА на стенде ПАРАМЕТР [3, 5].

Опытные данные по скорости фронта смачивания модельных тепловыделяющих сборок ВВЭР из штатных конструктивных элементов получены в [6] и обобщены зависимостью, учитывающей влияние расхода воды и температуры оболочек твэлов. Однако предложенные соотношения справедливы в ограниченном диапазоне изменения режимных параметров и не учитывают нагрев твэлов в процессе залива (имитацию остаточного тепловыделения реактора). На основе анализа опытных данных по расхолаживанию модельных ТВС ВВЭР в [7] предложено соотношение для определения времени смачивания оболочек твэлов в зависимости от величины остаточного энерговыделения, генерируемого в сборке в процессе залива. Однако полученная корреляция не учитывает запасенное тепло в элементах ТВС, зачастую превышающее накапливаемое в процессе залива тепло за счет остаточного энерговыделения, нагрев воды и пара.

В настоящей работе предложен инженерный метод расчета характеристик повторного залива модельных тепловыделяющих сборок на стенде ПАРАМЕТР, позволяющая определять наиболее важные характеристики повторного залива без применения расчетных кодов.

### Экспериментальная установка

Исследование процессов, протекающих при максимальной проектной и запроектной авариях, в том числе на стадии повторного залива, на стенде ПАРАМЕТР проводится на тепловыделяющих сборках из штатных конструктивных материалов с длиной участка  $L=1275$  мм, моделирующего теплогидравлические условия в активной зоне реактора. В качестве иллюстрации характерных ТВС на рис. 2 приведены поперечные сечения модельных 19 и 25 стержневых сборок, результаты испытаний которых при максимальной проектной аварии рассматриваются ниже.

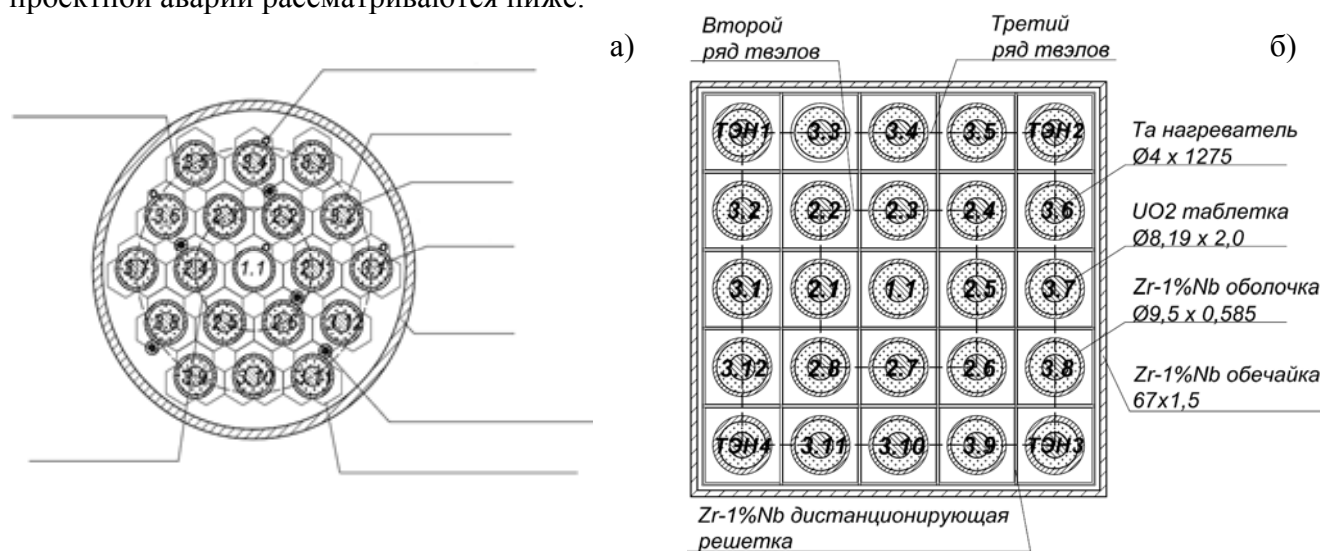


Рис. 2. фрагмент модели тепловыделяющей сборки: а) – ВВЭР, б) – PWR

Имитатор твэла ВВЭР изготавливается из  $UO_2$  таблеток естественного обогащения наружным диаметром  $\varnothing 7,57$  мм с увеличенным размером центрального отверстия до  $\varnothing 4,2$  мм и оболочки  $\varnothing 9,13 \times 0,7$  мм из сплава Э-110 ( $Zr+1\%Nb$ ) или Э-635 ( $Zr+2,5\%Nb$ ). Имитатор твэла PWR имеет наружный размер топливной таблетки  $\varnothing 8,19$  мм и толщину оболочки, равную 0,585 мм.

Условия МПА моделируются разогревом имитаторов твэлов электрическим током, пропускаемым по танталовым нагревателям  $\varnothing 4$  мм. Для исследования раздутия и

разгерметизации оболочек в модели твэлов предварительно закачивается инертный газ – гелий.

### Сценарий эксперимента

Сценарий экспериментов по исследованию проектных и максимальных проектных аварий реакторов ВВЭР и PWR на стенде ПАРАМЕТР были аналогичными. Эксперименты проведены в диапазонах изменения режимных параметров: максимальная температура оболочки– от 860 до 1200 °С, время выдержки при максимальной температуре – до 3000 сек, массовая скорость охлаждающей воды – от 20 до 85 кг/(м<sup>2</sup>·с), мощность, имитирующая остаточное тепловыделение – до 0,6 кВт/(твэл·м) и недогрев воды на входе в рабочий участок - от 82 до 105 °С. Данные измерений и сценарий эксперимента по исследованию МПА на модельных ТВС различной конструкции при заливе снизу приведены на рис. 3а, 3б. На рисунках даны обозначения ТЭП (например, Т2112), содержащие информацию по их расположению: первая цифра соответствует ряду твэлов в ТВС, вторая – номеру твэла в ряду, на котором установлена термопара, последующие – координату сечения по длине (x 100 мм). Здесь же приведены данные о подаваемых расходе воды ( $G_w$ ) и электрической мощности двух нагревательных секций ( $P1_{эл}$ ,  $P2_{эл}$ ).

На начальной стадии эксперимента тепловыделяющая сборка нагревалась до температуры 500 °С в среде пара и аргона с установившимся расходом. Повышением подводимой к модельной ТВС мощности имитаторы твэлов разогревались с заранее определенным темпом до температуры 850 ÷ 1200 °С в наиболее горячем сечении. На данном этапе происходили раздутие и разгерметизация оболочек, фиксируемые по резкому спаду давления. При достигнутой температуре ТВС выдерживалась в течение заданного времени для образования оксидного слоя на оболочках. Завершала эксперимент стадия расхолаживания ТВС при моделировании остаточного

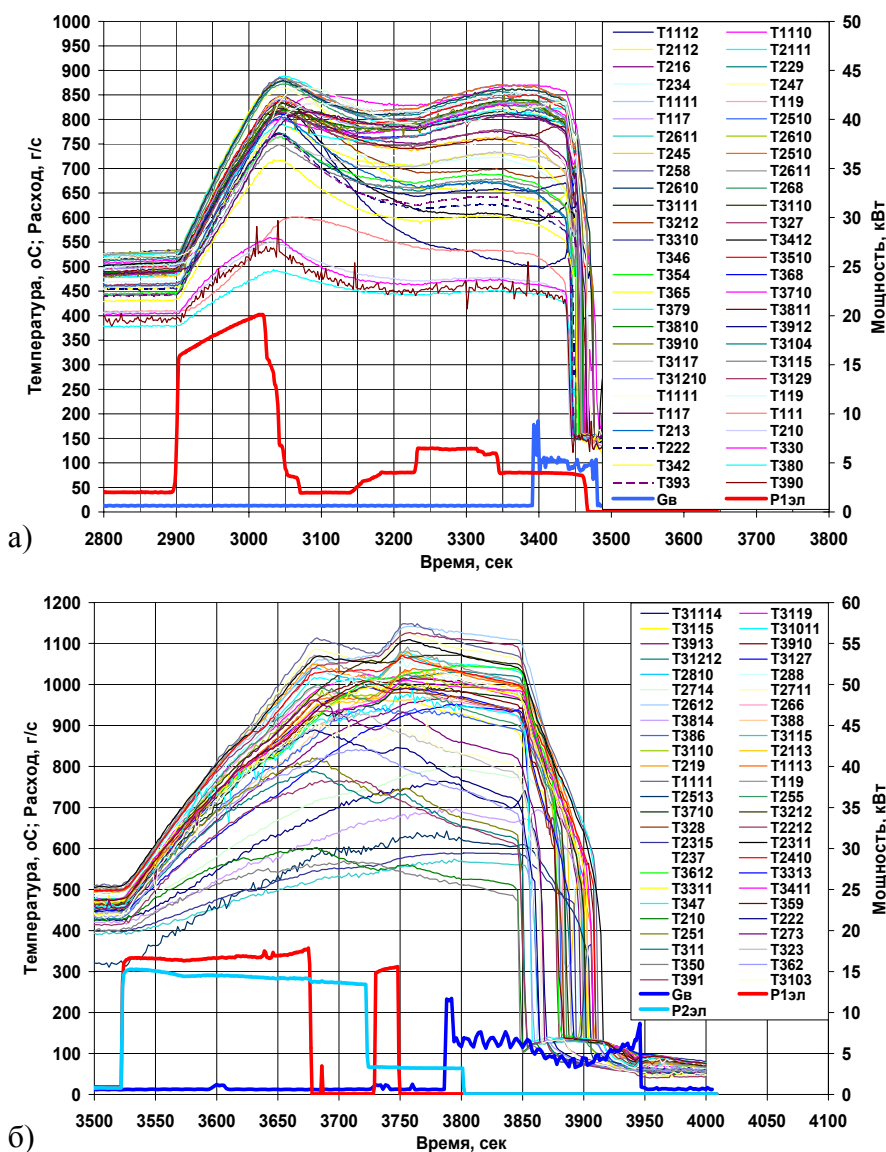


Рис. 3. Результаты исследования повторного залива снизу в условиях МПА: а) 19 стержневая модельная ТВС ВВЭР, б) 25 стержневая модельная ТВС PWR

тепловыделения или без него водой, подаваемой снизу с номинальным расходом 4÷5 г/(с·твэл).

### Описание балансовой методике

Для расчета основных характеристик расхолаживания модельных ТВС без применения расчетных кодов разработана приближенная методика. Методика основана на предположении равенства тепла, запасенного до стадии подачи воды, и подведенного и отведенного от ТВС тепла в процессе залива [8] и позволяет рассчитать динамику движения фронта смачивания и необходимый расход воды при повторном заливе тепловыделяющей сборки. Согласно допущению о балансе подводимого и отведенного тепла (рис. 4):

$$Q_{зан} + Q_{эл}^{внеш} + Q_{хим}^{ПЦР} = Q_{нагр}^{воды} + Q_{фаз} + Q_{нагр}^{пар} \quad (1)$$

Под запасенным теплом здесь и далее понимается избыточное (свыше температуры насыщения) тепло в имитаторах твэлов, обечайке, дистанционирующих решетках и термопарах.

В процессе повторного залива часть жидкости, поступающая в модельную ТВС, преобразуется в пар, что приводит к увеличению длительности ее расхолаживания. Из условия равенства свободного объема сборки как в холодном, так и нагретом состояниях можно записать:

$$G_в \Delta \tau_0 = (G_в - G_н) \Delta \tau_{фр} \quad (2)$$

Время заполнения участка межтвэльного пространства холодной ТВС равно:

$$\Delta \tau_0 = \Delta l / u_в = \rho_в \cdot F_{прых} \cdot \Delta l / G_в \quad (3)$$

Правая часть соотношения (1) записывается в виде:

$$Q_{нагр}^{воды} + Q_{фаз} + Q_{нагр}^{пар} = G_в c_p^в \Delta T_в + G_н h_{lg} + G_н c_p^n \Delta T_n \quad (4)$$

Расход пара, образующегося при подаче воды, определяется из соотношения (4):

$$G_н = G_в \Delta \tau_{фр} \left( 1 - \Delta \tau_0 / \Delta \tau_{фр} \right) \quad (5)$$

Представляя слагаемые  $Q_{эл}^{внеш}$  и  $Q_{хим}^{ПЦР}$  в уравнении (1), отвечающие за подвод тепла джоулевым нагревом и возникающей парциркулиевой реакцией, в виде произведения соответствующих мощностей на время залива, получим:

$$\frac{Q_{зан} + (P_{эл} + P_{ПЦР}) \cdot \Delta \tau_{фр}}{\left[ G_в c_p^в \Delta T_в + G_н (h_{lg} + c_p^n \Delta T_n) \right] \cdot \Delta \tau_{фр}} = 1 \quad (6)$$

Преобразованием выражений (2)÷(6) получены зависимости, описывающие время расхолаживания  $\tau_{фр}$  модельных ТВС (7) в условиях повторного залива при МПА при заданном начале отсчета времени  $\tau_0$  и относительный расход пара  $G_н/G_в$  (8), образующийся в этом процессе:

$$\tau_{фр} = \tau_0 + \frac{Q_{зан} + G_в (h_{lg} + c_p^n \Delta T_n) \Delta \tau_0}{G_в (c_p^в \Delta T_в + h_{lg} + c_p^n \Delta T_n) - P_{эл} - P_{ПЦР}} \quad (7)$$

$$\frac{G_н}{G_в} = \frac{Q_{зан} + (P_{эл} + P_{ПЦР}) \Delta \tau_0}{Q_{зан} + G_в (c_p^в \Delta T_в + h_{lg} + c_p^n \Delta T_n) \Delta \tau_0} \quad (8)$$

### Сопоставление опытных данных и результатов расчета по балансовой методике

Балансовая методика обоснована на данных 15 экспериментов с одиночными имитаторами твэлов и модельными ТВС различной конфигурации. В качестве примера на рис. 5а, 5б представлены опытные данные и результаты расчетов по формулам (7) и (8) по динамике продвижения фронта смачивания  $z_{фр}(\tau)$  при повторном заливе снизу модельных ТВС ВВЭР и РWR с окисленными, раздутыми и разгерметизированными в процессе эксперимента твэлами, предварительно разогретыми до  $860\text{ }^{\circ}\text{C}$  и  $1150\text{ }^{\circ}\text{C}$  в среде перегретого пара (см. рис. 3а, 3б).

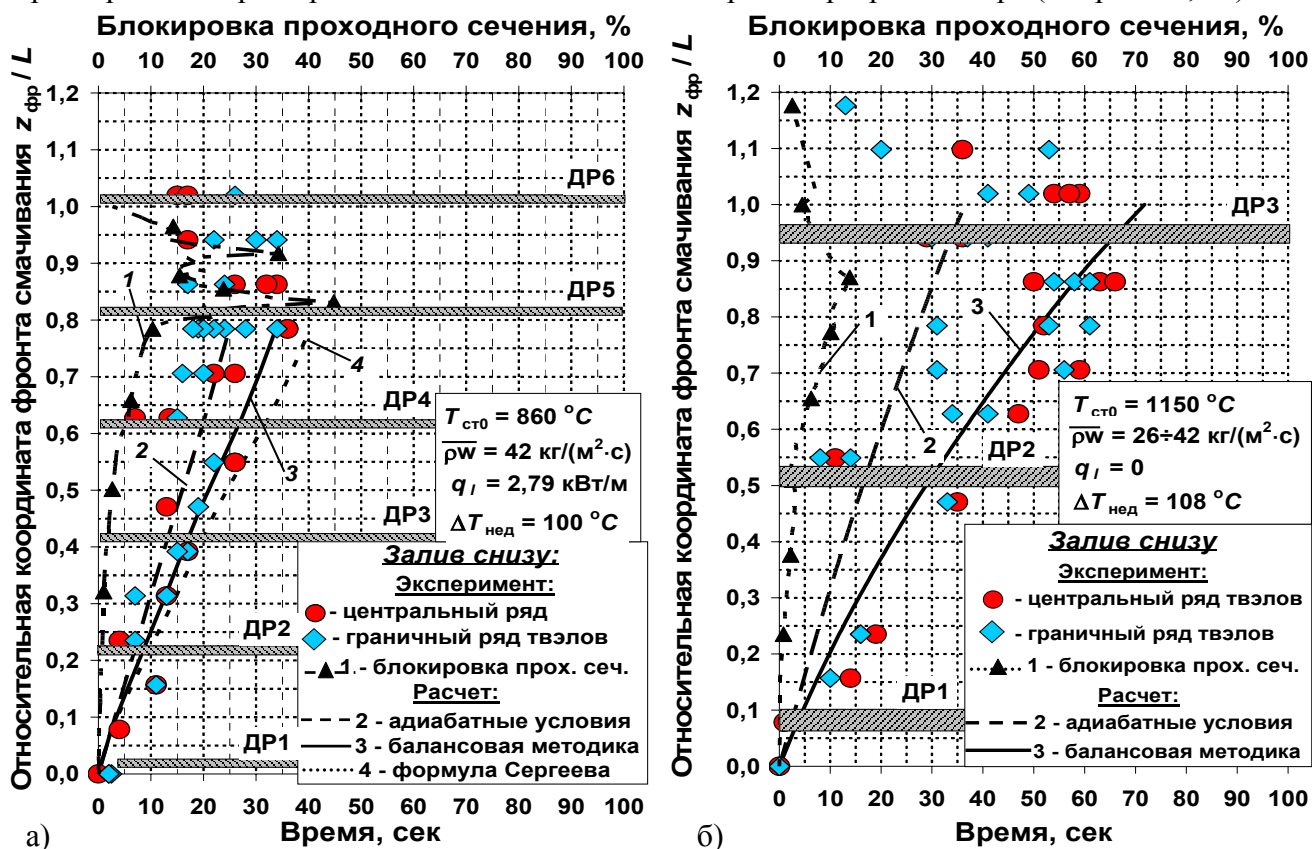


Рис. 5. Сопоставление экспериментальных и расчетных данных по динамике продвижения фронта смачивания для: а) 19 стержневой модельной ТВС ВВЭР, б) 25 стержневой модельной ТВС РWR

Дистанционирующие решетки и их истинные размеры показаны заштрихованными прямоугольниками. На рисунках 5а, 5б представлены: данные по изменению площади проходного сечения модельных ТВС (кривая 1); результаты расчетов положения уровня воды (кривая 2) и фронта смачивания оболочек твэлов по предложенной методике (кривая 3) во времени в холодном и нагретом состояниях; зависимость фронта смачивания от времени, рассчитанная по соотношению В.В. Сергеева (кривая 4). Возникновение смачивания оболочки твэла на заданном высотном уровне ТВС определялось моментом времени достижения на ней температуры насыщения (см. рис. 3а, 3б).

На рис. 5а, 5б показаны результаты измерений, выполненных в [9], уменьшения по длине площади проходного сечения теплоносителя за счет раздутия и разгерметизации оболочек. Максимумы на кривых блокировки проходного сечения соответствуют областям разгерметизации твэлов. Впервые представленные результаты расчета длительности расхолаживания модельных тепловыделяющих сборок в холодном и нагретом состояниях учитывают уменьшение площади проходного сечения по длине в результате раздутия оболочек на этапе разогрева ТВС. Сопоставление расчета по предлагаемой балансовой методике с опытными данными по положению фронта смачивания модельных тепловыделяющих сборок во времени показывает, что расхождение не превышает 10%. Длительность расхолаживания модельной тепловыделяющей сборки, рассчитанная по методике Сергеева В.В., завышает измеренную в эксперименте на 35%.

Сравнивая скорость фронта смачивания по рядам ТВС можно отметить их некоторое различие. В условиях расхолаживания модельных ТВС профиль скорости фронта смачивания по всему сечению сборки можно считать примерно равномерным до высотного уровня  $z_{фр}/L=L_{нр}\approx 0,7\div 0,8$ . При  $z_{фр}/L\geq L_{нр}$  скорость фронта смачивания становится существенно неоднородной по сечению и хаотически изменяется вблизи более горячих дистанционирующих решеток (рис. 5а, 5б), на которых образуются локальные фронты смачивания из-за осаждения капель влаги. В зоне раздутия и разгерметизации твэлов происходит перераспределение потока, приводящее к уменьшению скорости в местах блокировки проходного сечения ТВС, и увеличению - за ее пределами.

В области  $z_{фр}/L\geq L_{нр}$  в эксперименте наблюдается более раннее охлаждение оболочек, вызванное теплообменом со смесью насыщенного пара, образовавшегося при поверхностном кипении воды на нижних уровнях, с дисперсными включениями капель недогретой жидкости, а также значительным ускорением парожидкостного потока, скорость которого увеличивается на порядок и более по сравнению с течением жидкости в нижележащих сечениях. Оценки скорости потока, обтекающего модельную тепловыделяющую сборку, с применением соотношений (5), (8) показывают, что в условиях эксперимента смесь может достигать выходного сечения менее, чем за 3 секунды, в то время как участок ТВС длиной  $z_{фр}/L < 0,75$  вода преодолевает за 35 сек (рис. 5а) и 60 сек (рис. 5б). Дополнительно можно отметить, что основные закономерности протекания процесса расхолаживания тепловыделяющихборок ВВЭР и РWR аналогичны, что подтверждается представленными экспериментальными данными, и качественно согласуются с выводами работ [10, 11].

Разработанная методика позволяет рассчитывать параметры залива не только модельных тепловыделяющихборок при имитации аварий, но и оценивать их параметры для активных зон энергоблоков типа Фукусима Даи-ичи. При прекращении подвода электропитания к внешним системам реактора в активную зону энергоблока Фукусима Даи-ичи необходимо было подавать такой расход воды, который согласно формуле (7) компенсировал бы ежесекундно испаряющуюся жидкость в соответствии с зависимостью от времени уровня остаточного тепловыделения. Это можно осуществить с помощью пассивной системы охлаждения, представляющий собой замкнутый контур циркуляции. Образующийся в АЗ пар направляется в теплообменник-конденсатор, где охлаждается с помощью естественной конвекции и получаемый конденсат возвращается обратно в активную зону.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Предложен инженерный метод расчета основных характеристик расхолаживания при повторном заливе снизу модельных ТВС ВВЭР и РWR в условиях МПА, основанный на рассмотрении баланса тепла, запасенного в тепловыделяющей сборке до этапа залива и отведенного в процессе подачи жидкости.
2. Метод апробирован на данных 15 экспериментов в диапазоне температур до 1200 °С для модельных ТВС стенда ПАРАМЕТР из штатных конструктивных элементов различной конфигурации и масштабности и уменьшает отклонение от опытных данных, например, для 19 стержневой модельной ТВС - до 10%.
3. Разработанный метод позволяет рассчитывать параметры залива не только модельных тепловыделяющихборок при имитации аварий, но и оценивать их параметры для активных зон энергоблоков типа Фукусима Даи-ичи.

### Обозначения

$Q_{зан}$  - запасенное тепло в твэлах модельной ТВС, дистанционирующих решетках, обечайке и

термопарах, Дж;  $Q_{эл}^{внеш}$  и  $Q_{хим}^{ПЦР}$  - тепло, выделяющееся в нагревателях имитаторов ТВЭЛов и тепло пароциркониевой реакции, образуемое в процессе залива, Дж;  $Q_{фаз}$ ,  $Q_{нагр}^{нар}$  - отведенное тепло за счет подогрева воды, превращения части воды в пар и нагрева пара, Дж;  $G_в$  и  $G_n$  - расход воды и пара, образующегося в процессе залива, кг/с; заполнения объема холодной ТВС и длительность ее расхолаживания в нагретом состоянии, сек;  $F_{прох}$  - проходное сечение, м<sup>2</sup>;  $\Delta l$  - длина участка модельной ТВС, м;  $c_p^в$ ,  $c_p^n$  - изобарные теплоемкости воды и пара, Дж/(кг·К);  $h_{fg}$  - теплота парообразования, Дж/кг;  $\Delta T_в$ ,  $\Delta T_n$  - подогревы жидкости и пара, К;  $P_{эл}$  и  $P_{ПЦР}$  - мощности электрическая и за счет пароциркониевой реакции, Вт;  $L_{пр}$  - предельная длина участка расхолаживания твэла, меньше которой продвижение фронта смачивания можно считать восходящим и равномерным.

*Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, грант № 12-08-00471-а*

## Литература

1. Z. Hózer, L. Maróti, P. Windberg, "Quenching of High Temperature VVER Bundle", Proceedings of NURETH-9 on CD, San Francisco, 1999, ISBN 089448-650-0
2. Виноградов В.Н., Ложкин В.В., Сергеев В.В. Верификация российских теплогидравлических кодов на стандартных задачах повторного залива ВВЭР // Сб. трудов 2-й Всеросс. НТК «Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР». Подольск: ОКБ «Гидропресс». 2001. Т. 5. с. 48-56.
3. W. Hering, Ch. Homann, J.-S. Lamy. Comparison Report on the Blind Phase of the OECD International Standard problem №45 Excercise (QUENCH-06). FZKA Report, FZKA 6677, February 2002.
4. A.V. Salatov, P.V. Fedotov, P.G. Afanas'ev, V.S. Konstantinov, V.I. Nalivaev, N.Ya. Parshin, E.B. Popov, V.P. Semishkin, A.M. Shymskiy. The behavior modeling of 37 rod fuel assembly with Zr1%-Nb alloy cladding under LOCA conditions at PARAMETER facility. Proc. of the V International Conference on WWER fuel exploitation, modeling and experimental investigation, the 29th of September – the 3rd of October, September, 2005, Bulgaria.
5. Денискин В.П., Наливаев В.И., Федик И.И. и др., Стендовое моделирование различных стадий аварии с потерей теплоносителя реакторной установки с ВВЭР. Журнал «Атомная энергия», №11, 2004г.
6. С. С. Базюк, Е.Б. Попов, Н. Я. Паршин, Ю. А. Кузма – Кичта. Исследование повторного залива модельной ТВС ВВЭР. // Тепловые процессы в технике, 2010 г., №12, с. 546-555.
7. Сергеев В.В. Теплообмен в закризисной зоне парогенерирующих каналов и теплогидравлика ТВС в переходных и аварийных режимах // Автореф. дисс. ... докт. техн. наук, Обнинск, 2007.
8. Базюк С.С. Расчетно-экспериментальное исследование повторного залива модельных тепловыделяющих сборок ВВЭР при максимальной проектной и запроектной авариях. Автореф. дисс. ... канд. техн. наук, Москва, 2011.
9. Игнатьев Д.Н. Экспериментальное исследование поведения твэлов ВВЭР в условиях аварии с большой течью из первого контура РУ // Автореф. дисс. ... канд. техн. наук, Подольск, 2009.
10. С. С. Базюк, Д. Н. Игнатьев, Н. Я. Паршин, Е. Б. Попов, Д. М. Солдаткин, Ю. А. Кузма – Кичта. Исследование повторного залива модельных тепловыделяющих сборок ВВЭР при максимальной проектной и запроектной авариях на стенде ПАРАМЕТР и разработка методики расчета характеристик смачивания. // Тепловые процессы в технике, 2012 г., №4, с. 136-144.
11. S. Cho, H. S. Park, K. Y. Choi, K. H. Kang, W. P. Baek, Y. S. Kim. Core thermal hydraulic be-

havior during the reflood phase of cold-leg LBLOCA experiments using ATLAS facility // Nuclear Engineering and Technology, vol. 41, №10, p. 1263-1274 (2009)