

УДК 621.039.546

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВТОРНОГО ЗАЛИВА МОДЕЛЬНЫХ ТВС ЛЕГКОВОДНЫХ РЕАКТОРОВ ПРИ АВАРИИ С ПОТЕРЕЙ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ

Базюк С.С., Паршин Н.Я., Попов Е.Б. (НИИ НПО «Луч», г. Подольск, Московская обл.),
Кузма-Кичта Ю.А. (НИУ МЭИ, г. Москва)

При исследовании максимальной проектной и запроектной аварий легководных реакторов одним из основных вопросов является установление параметров оптимального расхолаживания активной зоны, определяемых по температуре оболочек. Теплогидравлические коды недостаточно надежно прогнозируют совокупность процессов при повторном заливе, когда температура оболочки выше 1000 °С. Поэтому оптимизация режимных параметров на стадии подачи охлаждающей воды расчетным моделированием затруднительна.

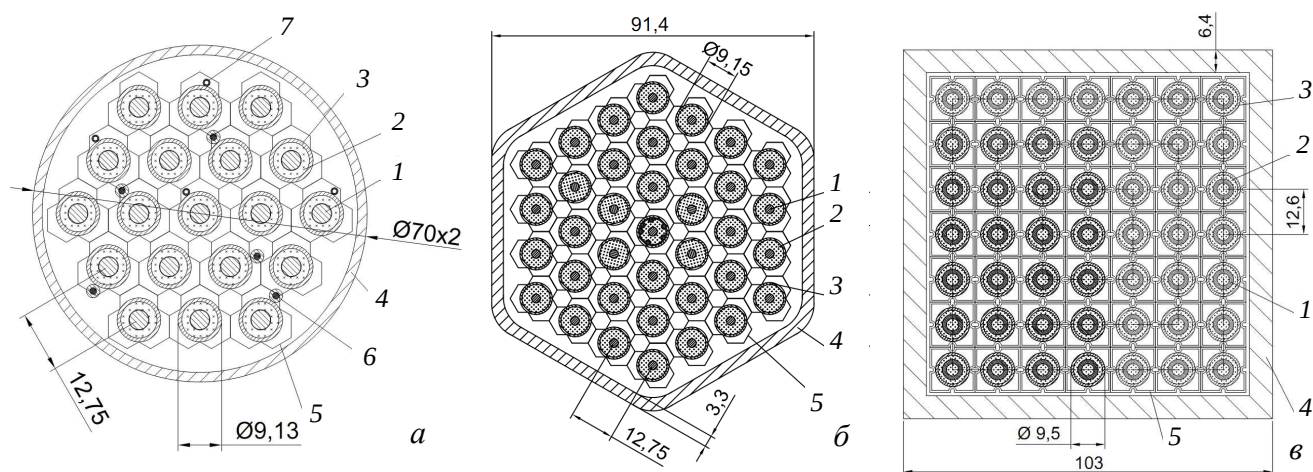
Повторный залив снизу модельных ТВС легководных реакторов при максимальной проектной аварии исследовали на стендах RBHT [1], СВД [2] с имитацией остаточного тепловыделения. Раздутие и разгерметизацию оболочек, взаимодействие циркониевого сплава с водой не моделировали. Несмотря на проведение экспериментов в широком диапазоне режимных параметров, оптимальные характеристики подачи жидкости не установлены. Запроектную аварию легководных реакторов исследовали на стендах CODEX [3], QUENCH [4] и ПАРАМЕТР [5] с моделированием остаточного тепловыделения ТВС. В экспериментах изучали термомеханические и физико-химические характеристики

топливных таблеток в условиях плавления и взаимодействия с циркониевым сплавом.

Время расхолаживания реактора в условиях подобных аварий можно оценить, зная скорость фронта смачивания ТВС. Опытные данные для модельных ТВС ВВЭР из штатных конструктивных элементов получены и обобщены в работе [6]. Однако предложенные соотношения справедливы в ограниченном диапазоне режимных параметров и не учитывают остаточное тепловыделение.

Как показывает обзор исследований, данные о повторном заливе из-за сложности взаимосвязанных процессов к настоящему времени не обобщены. Целью работы является получение обобщающего соотношения для скорости фронта смачивания модельных ТВС различной конфигурации и масштабности в широком диапазоне изменения режимных параметров.

Экспериментальные установки. В имитаторы твэлов ВВЭР модельных ТВС стенда ПАРАМЕТР длиной 1275 мм были помещены таблетки из диоксида урана наружным диаметром 7,57 мм с центральным отверстием диаметром 4,2 мм (рис. 1, а). Оболочка твэла размером 9,13×0,7 мм выполнена из сплава Э-110 или Э-635. В имитаторе твэла PWR наружный диа-



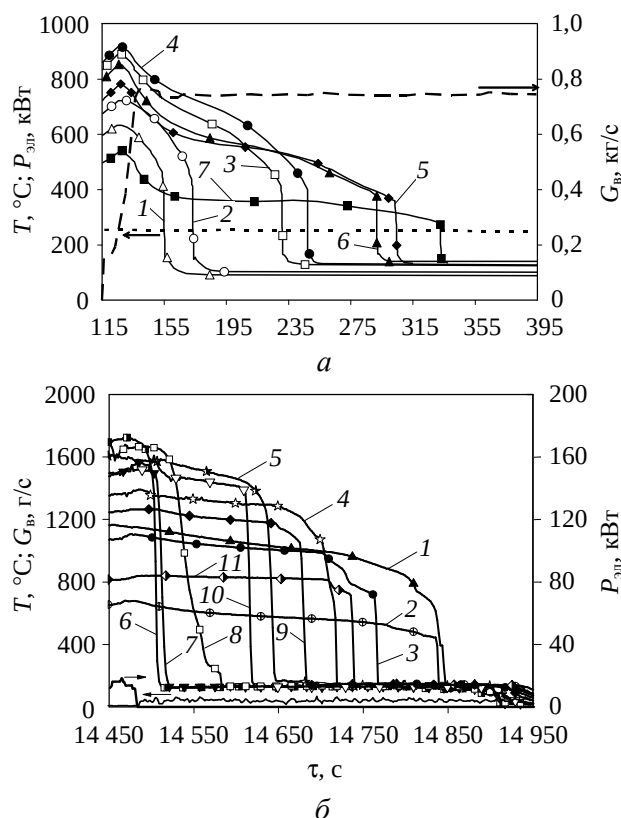
Р и с. 1. Модельные 19-стержневые ТВС ВВЭР стенда ПАРАМЕТР (а), 37-стержневые ВВЭР стенда СВД (б), 49-стержневые PWR стенда RBHT (в): 1 — танталовый, нихромовый из монели-500 нагреватель; 2 — таблетка из UO_2 , MgO , BN ; 3 — оболочка; 4 — обечайка; 5 — дистанционирующая решетка из сплава $Zr + 1\%Nb$, стали X12H10T, инконеля 600; 6, 7 — вольфрамовая и хромель-алюмелевая термopара соответственно

метр топливной таблетки составляет 8,19 мм, толщина оболочки 0,585 мм (рис. 1, б). Имитаторы твэлов закреплены в модельной ТВС дистанционирующими решетками, расположенными с шагом 255 и 440 мм для ВВЭР и PWR соответственно. Посредством пропускания электрического тока по танталовым или вольфрамовым проволочкам их разогревают.

В полномасштабной по длине ТВС стенда СВД, моделирующей условия в ВВЭР-1000, использовали твэлы со стальной оболочкой штатных размеров и наполнителем из уплотненного оксида магния (см. рис. 1, б). Имитаторы закрепляли в пучке стальными дистанционирующими решетками, расположенными с шагом 250 мм. Модельную ТВС нагревали пропусканием электрического тока по нихромовым проволочкам переменного сечения по длине, разделенной на пять зон, с варьированием коэффициента неравномерности мощности от 0,65 до 1,6.

Повторный залив снизу для условий PWR исследовали на стенде RBHT на 49-стержневых полномасштабных по длине модельных ТВС (рис. 1, в). Имитаторы твэлов изготовлены из стальных оболочек размером 9,5×0,71 мм и наполнителя из нитрида бора, в который вмонтирован витой нагреватель размером 5,72×1,14 мм из монели-500. Подведенную мощность варьировали по длине. Коэффициент неравномерности изменялся от 0,5 на концах активной зоны до 1,5 при $z/L = 0,75$.

Сценарии эксперимента. Эксперименты, моделирующие повторный залив, состояли из нескольких стадий. На рис. 2 показано изменение температуры оболочек имитаторов твэлов во времени в разных сечениях по высоте модельных ТВС. На подготовительном этапе эксперимента твэлы нагревали в среде насыщенного пара или пара и аргона до температуры оболочки 130 °С на стенде СВД или 500 °С на стенде ПАРАМЕТР. Повышением подводимой к модельной ТВС мощности твэлы разогревали с заранее определенным темпом до 620 °С на стенде СВД, 760—870 °С на стенде RBHT или 850—1200 °С на стенде ПАРАМЕТР в наиболее нагретом сечении. В серии экспериментов на стенде ПАРАМЕТР при указанной температуре и избыточном давлении газа происходили раздутие и разгерметизация твэлов. При имитации рассмотренных аварий ТВС ВВЭР и PWR вы-



Р и с. 2. Моделирование повторного залива снизу 49-стержневой ТВС PWR на стенде RBHT (а): температура оболочки твэла на расстоянии от входа 0,98 (1), 1,4 (2), 2,37 (3), 2,54 (4), 2,93 (5), 3,07 (6), 3,45 м (7) ряда 1, 4, 3, 2, 4, 2, 3 соответственно, сверху 19-стержневой модельной ТВС ВВЭР на стенде ПАРАМЕТР (б): температура оболочки твэла на расстоянии от входа 0,1 (1), 0,2 (2), 0,3 (3), 0,4 (4), 0,5 (5), 0,6 (6), 0,7 (7), 0,8 (8), 0,9 (9), 1 (10), 1,1 м (11) ряда 3, 2, 2, 1, 2, 2, 3, 1, 2, 3, 2 соответственно

держивали при 850—1200 °С в течение заданного времени для образования оксидного слоя на оболочках.

При моделировании повторного залива на стенде СВД жидкость подавали к модельной ТВС с одновременным снижением подводимой мощности к твэлам согласно закону спада остаточного тепловыделения ВВЭР-1000. В экспериментах на стенде RBHT залив снизу модельной сборки PWR осуществлялся при постоянном энерговыделении. Модельные ТВС стенда ПАРАМЕТР расхолаживали водой, подаваемой снизу с номинальным расходом на твэл 4—5 г/с или сверху с расходом 2 г/с при имитации остаточного тепловыделения или без него.

Обобщение данных о скорости фронта смачивания модельных ТВС. На основании анализа экспериментов по повторному заливу модельных ТВС сформирован массив данных, представленный в выбранных безразмерных пе-

ременных, которые привели к разработке обобщающего соотношения. Обобщающая зависимость основана на балансе тепла, которое запасено в ТВС до повторного залива, подведено в процессе подачи охлаждающей жидкости и отведено при расхолаживании.

Длительность расхолаживания твэла, разогретого выше температуры насыщения воды T_s , определяется установлением устойчивого контакта жидкости с оболочкой. Характеристикой, описывающей динамику снижения температуры твэлов, является скорость фронта смачивания модельной ТВС $u_{\text{фр}}$. Однако повторный залив разогретой сборки происходит медленнее по сравнению с ее заполнением в холодном состоянии, и его скорость характеризуется как

$$\tilde{u}_{\text{фр}} = u_{\text{фр}}/u_{\text{ад}} \leq 1,$$

где $u_{\text{ад}}$ — скорость заполнения водой холодной сборки (адиабатные условия).

Скорость движения воды в межтвэльном пространстве холодной ТВС

$$u_{\text{ад}} = G_{\text{в}}/(\rho_{\text{ж}} F_{\text{прох}}),$$

где $G_{\text{в}}$ — расход воды на входе в модельную ТВС, кг/с; $\rho_{\text{ж}}$ — ее плотность, кг/м³; $F_{\text{прох}}$ — проходное сечение модельной ТВС, м².

Введем безразмерный параметр Q^* , состоящий из двух слагаемых:

$$Q^* = Q_1^* + Q_2^*. \quad (1)$$

Первое слагаемое равно отношению тепла, запасенного в элементах конструкции ТВС до повторного залива, к отведенному на парообразование:

$$Q_1^* = Q_{\text{зап}}/(G_{\text{в}} r \tau_{\text{ад}}), \quad (2)$$

где $Q_{\text{зап}}$ — тепло, накопленное в твэлах до повторного залива, Дж; r — теплота парообразования, Дж/кг; $\tau_{\text{ад}}$ — время заполнения модельной ТВС водой в адиабатных условиях, с. Выражение (2) преобразовывается к виду

$$Q_1^* = [(\rho F)_{\text{тв}}/(\rho F)_{\text{ж}}] [\bar{c}_p (T_{\text{max}} - T_s)/r],$$

где $\rho_{\text{тв}}$ — среднemasсовая плотность твэла, кг/м³; $F_{\text{тв}}$ — его площадь, рассчитанная по наружному диаметру оболочки, м²; $\bar{c}_p$ — среднemasсовая изобарная теплоемкость твэла,

Дж/(кг·град); T_{max} — максимальная температура оболочки до повторного залива, °С.

Второе слагаемое в соотношении (1) равно отношению тепла, подводимого при повторном заливе за счет энерговыделения, к отведенному при подаче жидкости:

$$Q_2^* = (Q_{\text{эл}} \tau_{\text{фр}})/(G_{\text{в}} r \tau_{\text{ад}}), \quad (3)$$

где $Q_{\text{эл}}$ — мощность джоулева разогрева модельной ТВС, Вт; $\tau_{\text{фр}}$ — время заполнения ее межтвэльного пространства водой в горячем состоянии. Преобразовав уравнение (3), получим

$$Q_2^* = (q_l \tau_{\text{ад}})/[(\rho F)_{\text{ж}} r \tilde{u}_{\text{фр}}],$$

где q_l — линейная плотность теплового потока, Вт/м.

При повторном заливе на скорость смачивания влияют расход и недогрев воды, нагрев и энерговыделение в твэлах. Для учета влияния недогрева жидкости $\Delta T_{\text{нед}} = T_s - T_{\text{вх}}$ и температуры начала смачивания оболочки T_0 на скорость фронта смачивания введем безразмерный параметр

$$\theta = (T_0 - T_s)/(T_s - T_{\text{вх}}),$$

где $T_{\text{вх}}$ — температура жидкости на входе в модельную ТВС, °С. Этот параметр косвенно учитывает влияние изменения давления на скорость фронта смачивания.

Для прогнозирования длительности залива модельных ТВС, нагретых до температуры T_{max} , необходимо знать температуру смачивания, которая изменяется в экспериментах в диапазоне от 280 до 530 °С и зависит от состояния поверхности оболочки, тепловой инерционности твэла. На основании анализа экспериментов предложено соотношение для расчета температуры смачивания T_0 , описывающее опытные данные с погрешностью до 30%:

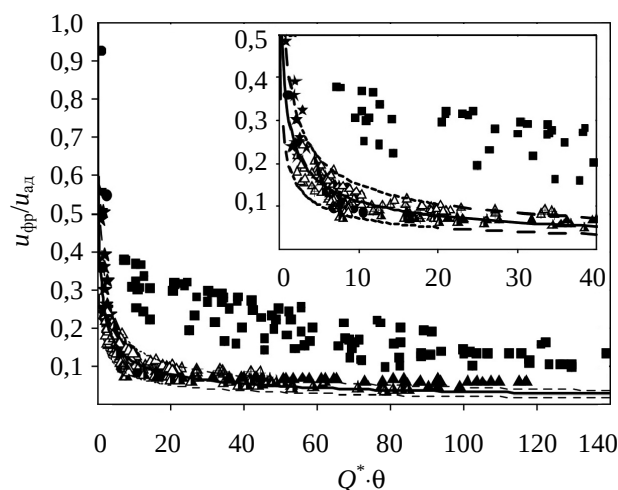
$$(T_0 - T_s)/(T_{\text{max}} - T_s) = 0,45.$$

В работе сформирован массив данных о скорости фронта смачивания модельных ТВС и представлен в безразмерных переменных. Этот массив данных описан обобщающей зависимостью для относительной скорости фронта смачивания модельной ТВС

$$\tilde{u}_{\text{фр}} = \frac{1}{1 + A(Q^*\theta)^n}. \quad (4)$$

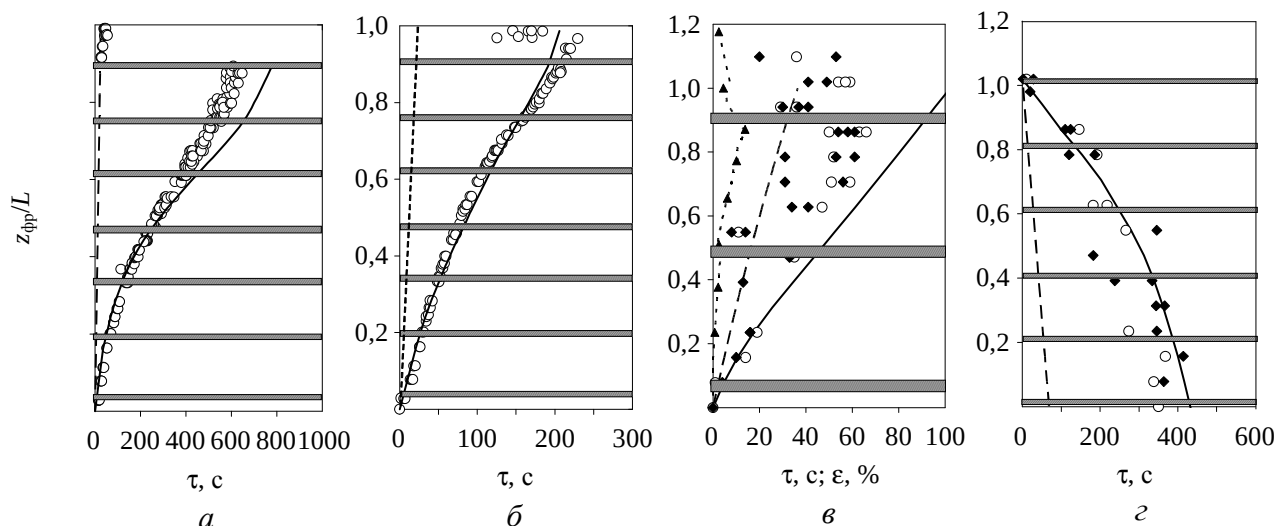
Эмпирические коэффициенты определены методами регрессионного анализа: $A = 2,135$, $n = 0,571$. Предлагаемая зависимость описывает опытные данные для различных конструкций имитаторов твэлов и учитывает влияние максимальной температуры оболочек T_{max} , остаточного тепловыделения, расхода и недогрева охлаждающей воды, давления.

Обобщение опытных данных в виде зависимости $\tilde{u}_{\text{фр}}(Q^*, \theta)$ показано на рис. 3. Как видно, при массовой скорости $\rho w = 47\text{—}160 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ опытные данные описываются зависимостью (4) с отклонением, не превышающим 30%. При повторном заливе модельных ТВС снизу с массовой скоростью охлаждающей воды $\rho w \leq 30 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ данное соотношение занижает скорость смачивания $\tilde{u}_{\text{фр}}$, что, возможно, вызвано интенсивным парообразованием и уносом капель влаги, изменением структуры потока и механизмов теплоотвода. Обобщение данных для этих условий является предметом дальнейших исследований.



Р и с. 3. Опытные данные при массовой скорости 47—160 $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ и недогреве воды на входе в модельную ТВС, равном 11 ($\blacktriangle$), 23 ($\triangle$), 53 ($\triangleleft$), 83 $^\circ\text{C}$ (Δ) для стенда RBHT, 76 $^\circ\text{C}$ ($\star$) для стенда СВД, 104—118 $^\circ\text{C}$ ($\bullet$) для стенда ПАРАМЕТР, массовой скорости $\leq 30 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ при недогреве воды 11 $^\circ\text{C}$ ($\blacksquare$): — — расчет по зависимости (4); - - - отклонение 35%

Оценка длительности расхолаживания модельных ТВС ВВЭР и PWR. На рис. 4 сопоставляются опытные и расчетные данные о движении фронта смачивания модельных сборок от времени $z_{\text{фр}}(\tau)$. При сопоставлении данных по зависимости $z_{\text{фр}}/L(\tau)$ температура определялась как средняя по сечению ТВС. Как вид-



Р и с. 4. Опытные и расчетные данные о положении фронта смачивания модельных ТВС во времени для центрального ($\circ$) и граничного рядов твэлов ($\blacklozenge$) при адиабатных условиях (- - -), согласно зависимости (4) (—): а, б — повторный залив снизу 49-стержневой ТВС PWR, стенд RBHT при недогреве воды $\Delta T_{\text{нед}} = 23 \text{ }^\circ\text{C}$, максимальной температуре 930 $^\circ\text{C}$, давлении 0,14 МПа, массовой скорости 145—160 $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$, линейной тепловой нагрузке 1,53 кВт/м и $\Delta T_{\text{нед}} = 83 \text{ }^\circ\text{C}$ при максимальной температуре 920 $^\circ\text{C}$, давлении 0,28 МПа, массовой скорости 148—156 $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$, линейной тепловой нагрузке 1,53 кВт/м, в — снизу 25-стержневой ТВС PWR, стенд ПАРАМЕТР при недогреве воды 108 $^\circ\text{C}$, максимальной температуре 1150 $^\circ\text{C}$, давлении 0,25 МПа, массовой скорости 26—42 $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$, без нагрева; з — сверху 19-стержневой ТВС ВВЭР, стенд ПАРАМЕТР при недогреве воды 85—125 $^\circ\text{C}$, максимальной температуре 1730 $^\circ\text{C}$, давлении 0,11 МПа, массовой скорости 17—21 $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$, без нагрева ($\blacksquare$ — дистанционирующие решетки)

но, опытные данные претерпевают малый разброс вследствие большого расхода жидкости. Длительность расхолаживания 49-стержневой модельной ТВС, рассчитанная с использованием обобщающей зависимости (4), согласуется с экспериментальными данными с погрешностью, не превышающей 6%.

Увеличение недогрева поступающей в модельную ТВС воды приводит к упорядоченному и раннему расхолаживанию твэлов восходящим потоком (см. рис. 4, б). Интенсивность парообразования и уноса капель в нижней части сборки низкая. Поэтому снижение температуры оболочек, охлаждаемых однофазной конвекцией к парокапельному потоку, в верхней части сборки незначительно. Это подтверждает малый разброс опытных данных по сравнению с условиями, показанными на рис. 4, а. Расчетная длительность расхолаживания модельной сборки по соотношению (4) на 7% меньше по сравнению с наблюдаемой в эксперименте.

Зависимость $z_{\text{фр}}/L(\tau)$ при повторном заливе снизу модельной ТВС PWR стенда ПАРАМЕТР в условиях максимальной проектной аварии показана на рис. 4, в. В данном эксперименте запасенное тепло, приходящееся на один твэл, превышает тепло имитатора PWR стенда RBHT в 2,2 раза, имитация остаточного тепловыделения отсутствует. Большой разброс опытных данных вызван раздутием, разгерметизацией оболочек твэлов, проявляющимися в сечениях сборки при $z_{\text{фр}}/L \geq 0,75$. Неравномерное по длине окисление и изменение шероховатости оболочек приводят к неупорядоченности смачивания модельной ТВС. Оценка длительности повторного залива модельной ТВС PWR на основе обобщающей зависимости показывает, что расхождение по времени смачивания имитаторов твэлов с опытными данными составляет 32%. Таким образом, обобщающая зависимость (4) позволяет описать скорость фронта смачивания модельных ТВС при повторном заливе в условиях отсутствия значительного вклада пароциркониевой реакции. Например, эта зависимость позволяет удовлетворительно описать время расхолаживания модельной ТВС для режимов, отличающихся температурой оболочки и способом подачи воды. Длительность повторного залива 19-стерж-

невой модельной ТВС оценена в том числе и при заливе сверху (см. рис. 4, г) в условиях моделирования запроектной аварии в эксперименте [6]. Предварительно ТВС выдерживали в пароаргоновой среде при 1200 °С в течение 3500 с. Это обеспечивало образование оксидного слоя на оболочках толщиной около 300 мкм. Далее жидкость подавали к твэлам, разогретым до 1600 °С. Интенсивное тепловыделение за счет пароциркониевой реакции при повторном заливе, по-видимому, незначительно вследствие большой толщины оксидного слоя на стадии выдержки ТВС. Значительный разброс опытных данных вызван, на наш взгляд, частичным плавлением конструктивных элементов, растворением топливных таблеток и изменением геометрии модельной сборки. Вследствие перераспределения потока смачивание граничного ряда твэлов происходит раньше по сравнению с центральным. Однако даже применительно к этим условиям расхождение расчетной и измеренной длительности расхолаживания модельной ТВС не превышает 20%.

Выводы. На основании проанализированных температурных режимов твэлов при повторном заливе модельных ТВС ВВЭР и PWR, испытанных на трех крупномасштабных стендах (RBHT, СВД, ПАРАМЕТР) в условиях максимальной проектной и запроектной аварий, создан массив данных о скорости фронта смачивания ТВС, предложены безразмерные переменные для его обработки, разработана обобщающая зависимость, описывающая опытные данные с отклонением до 30%, учитывающая влияние массовой скорости воды в диапазоне 47—160 кг/(м²·с), недогрева жидкости на входе в модельную ТВС 11—118 °С, энерговыведения до 2,3 кВт/м и максимальной температуры оболочек твэлов от 460 до 1600 °С. При расхолаживании модельной ТВС в условиях малого расхода и недогрева жидкости до температуры насыщения опытные данные описываются полученной зависимостью с большим отклонением. Скорее всего, это связано с изменением структуры потока и механизмов переноса тепла.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, грант 12-08-00471-а.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Hochreiter L., Cheung F. RBHT Reflood Heat Transfer Experiments Data and Analysis. The Pennsylvania State University. NUREG/CR-6980, 2012.
2. Сергеев В.В. Теплообмен в закризисной зоне парогенерирующих каналов и теплогидравлика ТВС в переходных и аварийных режимах. Дис. на соискание ученой степени д-ра техн. наук. Обнинск, ФЭИ, 2007.
3. Hozer Z., Maroti L., Nagy I. e.a. CODEX-2 Experiment: Integral VVER-440 Core Degradation Test. KFKI-2000-02/G, 2000.
4. Базюк С.С., Попов Е.Б., Паршин Н.Я., Кузмяк Ю.А. Исследование повторного залива модельной ТВС ВВЭР. — Тепловые процессы в технике, 2010, № 12, с. 546—555.
5. Базюк С.С., Попов Е.Б., Паршин Н.Я. и др. Исследование повторного залива модельных тепловыделяющих сборок ВВЭР при максимальной проектной и запроектной авариях на стенде ПАРАМЕТР и разработка методики расчета характеристик смачивания. — Там же, 2012, № 4, с. 136—144.
6. Kiselev A., Nalivaev V., Parshin N.E. e.a. Modeling of thermal hydraulics aspects of top water reflood experiment PARAMETER-SF3 using SOCRAT/V2 code. — In: 20th Intern. Conf. on Structural Mechanics in Reactor Technology (SMiRT 20), 2009, v. 1, p. 182.

Поступила 30.01.13

В окончательной редакции 10.04.14

УДК 621.311.22

НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ВОДОПОДГОТОВИТЕЛЬНЫХ УСТАНОВОК АЭС

Юрчевский Е.Б., Пичугина М.А. (ООО «АКВАХИМ», г. Москва),
Первов А.Г. (ВПО «Московский гос. строительный ун-т», г. Москва)

Водно-химический режим, снижая коррозионное повреждение конструкционных материалов второго контура, предотвращая отложения на теплообменных поверхностях и обеспечивая минимальный объем жидких сбросов, в значительной мере определяет надежность и безопасность эксплуатации АЭС [1]. Ужесточение норм, регламентирующих водно-химический режим, является общемировой тенденцией. В частности, современные нормы качества теплоносителя АЭС наряду с такими традиционными показателями, как удельная электропроводность, концентрация кислорода, железа и др., содержат новый показатель «общий органический углерод». Например, для Нововоронежской АЭС-2 этот показатель ограничен 0,5 мг/дм³ для водного теплоносителя обоих контуров и 0,1 мг/дм³ для добавочной воды. Такое жесткое нормирование, принятое на зарубежных электростанциях 10 лет назад, объясняется вредным воздействием некоторых органических веществ, поступающих в теплоноситель, главным образом, с добавочной водой.

Органические вещества, разлагаясь в зоне высокой температуры, могут продуцировать слабые, карбоновые и сильные кислоты, понижающие pH значительно меньше допустимых пределов. Характер взаимодействия органических соединений и продуктов их термолитиза с

корректирующими водный режим реагентами и конструкционными материалами изучен пока недостаточно. Поэтому нормирование общего органического углерода энергоблоков с ВВЭР-1000 объяснимо. Еще более жесткое нормирование общего органического углерода принято для энергоблоков АЭС с быстрыми реакторами. Для этих энергоблоков предельная концентрация общего органического углерода в питательной воде парогенератора не должна превышать 0,2 мг/дм³.

Важная роль в обеспечении норм водно-химического режима принадлежит водоподготовительной установке, предназначенной для первичного заполнения водой циркуляционных контуров АЭС и восполнения потерь пара и турбинного конденсата. Традиционная технология подготовки добавочной воды с использованием реагентных осветлителей, механических и ионообменных фильтров обеспечивает выполнение ранее действующих нормативных требований к ее качеству. Описанная технология позволяет снизить остаточное содержание всех ионизированных примесей в добавочной воде до 0,01 мг/дм³, электропроводность приближается к теоретическому пределу для химически чистой воды 0,056 мкСм/см. Однако некоторое количество неионизированных примесей, состоящих из соединений железа, кремния, алюминия