

РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ПОВТОРНОГО ЗАЛИВА НА КРУПНОМАСШТАБНОЙ МОДЕЛИ ТВС ВВЭР© 2025 г. М. А. Быков^а, *, Ю. А. Мигров^б, М. В. Сазонтова^б, А. Н. Чуркин^а^аАО ОКБ “Гидропресс”, ул. Орджоникидзе, д. 21, г. Подольск, Московская обл., 142103 Россия^бНИТИ им. А.П. Александрова, Копорское ш., д. 72, г. Сосновый Бор, Ленинградская обл., 188540 Россия

*e-mail: bykov@grpress.podolsk.ru

Поступила в редакцию 17.09.2024 г.

После доработки 13.11.2024 г.

Принята к публикации 30.11.2024 г.

В статье представлен краткий обзор экспериментальных и расчетных работ по изучению явления повторного залива, реализующегося при больших течах I контура и последующей подаче охлаждающей жидкости в водо-водяных энергетических реакторах (ВВЭР) под давлением. Проанализированы результаты проекта PREMIUM, осуществленного OECD (CSNI), по оценке прогнозирования параметров повторного залива с помощью наиболее известных расчетных кодов (RELAP5, SATHARE, ATHLET, APROS, MARS). Расчеты были выполнены с использованием данных одного из экспериментальных режимов, смоделированных на стенде FEBA (Германия) по имитации повторного залива. Констатируется, что неопределенность оценки максимальной температуры твэлов с помощью известных системных расчетных кодов по результатам валидационных расчетов может достигать 100°C. На основе статистически значимой совокупности экспериментов, проведенных на уникальном стенде повторного залива в ОКБ “Гидропресс” при различных схемах подачи охлаждающей воды, выполнена валидация отечественного расчетного кода КОРСАР, включая гравитационный режим повторного залива при подаче воды в верхнюю часть модели напорной камеры реактора. Показано, что по точности оценки максимальной температуры имитаторов твэлов и по времени залива экспериментальной сборки ТВС код КОРСАР не уступает лучшим зарубежным аналогам.

Ключевые слова: повторный залив, эксперимент, расчет, валидация кодов, оценка погрешности, тепловыделяющая сборка, большая течь, программный комплекс КОРСАР

DOI: 10.56304/S0040363624600964

Аварии с потерей теплоносителя, превышающей производительность систем нормальной подпитки, являются наиболее опасными для водо-водяных реакторов под давлением. Так как разрушение корпуса реактора считается крайне маловероятным событием, при рассмотрении таких аварий ограничиваются анализом разрывов холодного или горячего трубопровода I контура вплоть до гильотинного разрыва с двусторонним истечением теплоносителя. Для сокращенного обозначения подобных аварий в зарубежной литературе принята аббревиатура LBLOCA – Large-Break Loss-Of-Coolant Accident. Как только происходит разрыв, давление в реакторе интенсивно падает. Темп его снижения определяется скоростью звука в теплоносителе, площадью проходных сечений и гидравлическими сопротивлениями элементов оборудования I контура. Очень короткая по времени стадия снижения давления недогретой жидкости сменяется более длитель-

ной стадией истечения двухфазной смеси в условиях объемного кипения теплоносителя. На стадии так называемого напорного истечения теплоносителя теплогидравлические процессы в активной зоне зависят от темпов снижения давления в сборной и напорной камерах реактора.

Отличительной особенностью аварийных режимов с разрывом холодной нитки на входе в реактор являются быстрое уменьшение давления в I контуре до давления в защитной оболочке и практически полное обезвоживание реактора на первой стадии аварии. После сброса аварийной защиты по сигналу снижения давления в I контуре уменьшение нейтронной мощности реактора происходит довольно быстро (в том числе вследствие отрицательных обратных связей по плотности теплоносителя и температуре топлива). Однако, несмотря на снижение тепловой нагрузки, на твэлах тепловыделяющихборок (ТВС) возникает кризис теплообмена, обусловленный “засто-

ем” теплоносителя в момент опрокидывания расхода, объемным вскипанием теплоносителя и запариванием активной зоны. При обезвоживании активной зоны ухудшается теплоотвод с поверхности твэлов, а температурное поле в сечении твэла выравнивается. При этом температура оболочки твэла растет, период ее роста определяется постоянной времени (около 3 с), а ее максимальное значение близко к среднему значению температуры топлива в этом сечении. Далее на первой стадии аварии давление в реакторе, а значит, и температура пароводяной смеси, продолжают падать, а “застой” теплоносителя в активной зоне сменяется его движением сверху вниз, температура оболочек твэлов снижается. Однако в конце первой стадии в результате обезвоживания активной зоны начинается повторный разогрев оболочек твэлов.

На второй стадии аварии начинается залив активной зоны водой из системы аварийного охлаждения зоны (САОЗ). При этом температура обезвоженной части твэлов продолжает увеличиваться. В зависимости от мощности ТВС залив в различных частях активной зоны возможен как снизу, так и сверху и снизу (комбинированный залив). Рост температуры твэлов прекращается по мере залива всей активной зоны.

Разрыв трубопровода горячей нитки является более “мягкой” аварией, поскольку, по крайней мере на стадии напорного истечения теплоносителя, происходит рост его объемного расхода через активную зону, при котором демпфируется разогрев твэлов ТВС.

Важно отметить, что цирконий, из которого изготовлены оболочки твэлов, при высоких температурах (более 800°C) вступает в экзотермическую реакцию с паром с образованием оксида циркония. Энергия пароциркониевой реакции при анализе безопасности должна добавляться к энергии остаточного энерговыделения и аккумулярованной энергии топлива.

При снижении давления в I контуре поэтапно включаются в работу активные и пассивные системы охлаждения активной зоны, обеспечивая подачу воды в реактор. Вода из гидроемкостей САОЗ (в проектах реакторных установок с ВВЭР) впрыскивается одновременно как в верхнюю, так и в кольцевую напорную камеру реактора. При этом при подаче холодной воды в напорную камеру часть поступающей воды может, огибая шахту активной зоны, уйти непосредственно в течь. Такое явление называется байпасированием аварийной воды. Этот процесс реализуется одновременно с конденсацией пара в напорной камере, так как он контактирует с холодной водой, поступающей из САОЗ.

К моменту почти полного опорожнения гидроемкостей САОЗ начинается формирование уровня воды в напорной камере и теплоноситель под действием гравитационных сил поступает снизу в активную зону. Когда уровень воды достигает нижнего торца топлива, начинается стадия повторного залива, которая характеризуется изменением состояния теплоносителя в активной зоне от паровой фазы до пароводяной смеси и затем до водяной фазы. Механизм теплообмена также изменяется (от конвективного охлаждения твэлов паром до перемежающихся режимов закризисного и докризисного теплообмена), и, наконец, происходит переход к пузырьковому кипению и конвективному теплообмену между твэлами и водой.

Фронт смачивания, который сопровождает повторный залив твэлов, очень динамичен, что характеризуется большими осцилляциями физического уровня и, как следствие, значительной амплитудой изменения интенсивности теплообмена.

Анализ параметров легководных реакторов с водой под давлением типа ВВЭР в авариях LBLOCA является одной из важнейших процедур при обосновании их безопасности. Следует считать общепризнанным, что в настоящее время главным инструментом для прогнозирования параметров реакторных установок в авариях LBLOCA являются так называемые системные расчетные коды, а эксперименты на электрообогреваемых моделях служат преимущественно для подтверждения адекватности воспроизведения физических явлений в используемых расчетных моделях (для валидации кодов). При этом интегральные экспериментальные установки, такие как LSTF (Япония), PKL (Германия), BETHSY (Франция), ПСБ-ВВЭР (Россия), используются для имитации аварий с потерей теплоносителя от исходного стационарного состояния до конечной стадии расхолаживания, а локальные стенды предназначены для моделирования в том числе наиболее сложной стадии LBLOCA — повторного залива (табл. 1).

В соответствии с нормативными требованиями для LBLOCA необходимо обеспечить реалистичный прогноз динамики изменения температуры твэлов ТВС в активной зоне с научно обоснованной оценкой погрешности (неопределенности) рассчитываемых параметров [10].

В [11] подчеркивается, что при авариях с потерей теплоносителя погрешность прогнозирования температуры оболочек твэлов не должна превышать по абсолютному значению 10°C. К сожалению, несмотря на продолжающиеся в течение последних десятилетий исследования наи-

Таблица 1. Экспериментальные установки для моделирования процессов повторного залива ТВС

Установка	Страна (организация)	Количество стержней	Литературный источник
REWET-II	Финляндия (VTT)	19	[1]
QUENCH	Германия (FZKA)	21	[2]
FEBA	Германия (KfK)	25	[3]
RBHT	США (NEA)	49	[4]
ROSA-III	Япония (JAERI)	64	[5]
FLECHT	США (Westinghouse Electric)	161	[6]
СВД-1	Россия (ГНЦ РФ-ФЭИ)	7	[7]
СВД-2	Россия (ГНЦ РФ-ФЭИ)	37	[7]
ПАРАМЕТР	Россия (НПО “ЛУЧ”)	37	[8]
СПЗ	Россия (ОКБ “Гидропресс”)	127	[9]

Примечание. СВД – стенд высокого давления; СПЗ – стенд повторного залива.

Таблица 2. Результаты расчетов базового сценария экспериментального режима повторного залива на стенде FEBA

Страна (организация)	Код	Максимальная температура твэлов, °С	Время залива, с
Германия (GRS)	ATHLET 2.2B	958	422
Чехия (NRI)	ATHLET 2.1A	933	477
Бельгия (Bel V)	CATHARE 2 V2.5_2 mod8.1	877	516
Франция (CEA)	CATHARE 2 V2.5_2 mod8.1	931	429
Франция (IRSN)	CATHARE 2 V2.5_2 mod8.1	925	462
Республика Корея (KAERI)	MARS-KS 1.3 (COBRA-TF Module)	921	587
Республика Корея (KINS)	MARS-KS-003	946	350
Россия (ОКБМ)	RELAP/SCDAPSIM Mod3.4	915	489
Бельгия (Tractebel)	RELAP5 Mod3.3	870	290
Италия (UNIPI)	RELAP5 Mod3.3 patch 3	908	378
Испания (UPC)	RELAP5 Mod3.3 patch 4	890	392
Германия (KIT)	TRACE Version 5 patch 3	978	430
Финляндия (VTT)	APROS 5.11.02	858	396
Германия (KfK) (эксперимент)		940	~450

более опасной стадии LBLOCA – повторного залива, достичь указанной точности при расчетах температуры твэлов не удастся. В этом смысле показательны результаты проекта PREMIUM [12], реализация которого организована Комитетом по безопасности ядерных установок (CSNI) Организации экономического сотрудничества и развития (OECD), по оценке прогнозирования параметров повторного залива с помощью наиболее известных расчетных кодов на базе одного из экспериментальных режимов, исследуемых на стенде FEBA (Германия) [13]. Эти результаты в

обобщенном виде представлены в табл. 2, заимствованной из [12]. Как следует из таблицы, различия в максимальной температуре имитаторов твэлов достигают 120°C, а по времени залива сборки – около 300 с (в эксперименте на стенде FEBA общее время залива составляет примерно 450 с). Характерен также так называемый “эффект пользователя”. Например, по одной и той же версии CATHARE2 получены заметно различающиеся значения как для времени залива (около 90 с), так и для максимальной температуры (54°C).

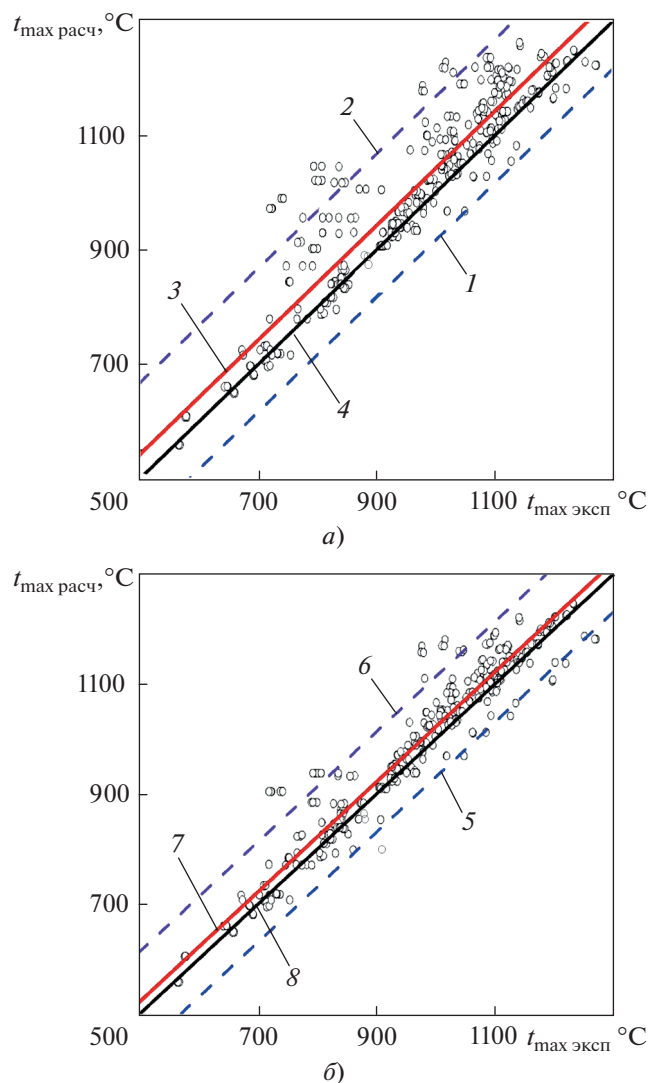


Рис. 1. Валидация базовой (а) и модернизированной (б) версии кода RELAP5 по экспериментальным данным стенда RBHT в режимах повторного залива [6], нижняя y_- и верхняя y_+ границы доверительного интервала, среднеарифметическое отклонение y_{cp} :
 $1 - y_- = y_{cp} - 124.8$; $2 - y_+ = y_{cp} + 124.8$; $3 - y_{cp} = x + 42.1$; $4, 8$ – линии совпадения расчетных и экспериментальных значений; $5 - y_- = y_{cp} - 90.8$; $6 - y_+ = y_{cp} + 90.8$; $7 - y_{cp} = x + 22.0$

Причина различий параметров, прогнозируемых расчетными кодами, — чрезвычайная сложность исследуемого сугубо нестационарного физического явления и, как следствие, эмпирический характер расчетных моделей повторного залива (преимущественно одномерных). К этому следует добавить проблемы масштабирования, влияние на условия охлаждения дистанционирующих и перемешивающих решеток в ТВС [11, 14] и ряд других трудно поддающихся численному моделированию факторов. Перемешивающие и дистанционирующие решетки име-

ют в сумме заметное гидравлическое сопротивление, в результате чего заливаемая снизу (и/или сверху) вода скапливается в области решеток.

В последние годы, прежде всего благодаря использованию современных средств диагностики двухфазных потоков, предприняты попытки уточнить математические модели повторного залива. В частности, в [15, 16] выполнены исследования механизма формирования капель на фронте охлаждения и динамики изменения их диаметра в дисперсном потоке. Капли испаряются на горячей стенке, разрушаются разделительными решетками и аэродинамическими силами пара, а также сталкиваются и объединяются с другими каплями по мере движения по потоку. Предложенные формулы для расчета изменения диаметра капель реализованы в коде RELAP5. Применение уточненной версии системного расчетного кода RELAP5/MOD3.3 позволило более точно моделировать процесс повторного залива. По результатам экспериментов на стенде RBHT (рис. 1) среднее значение максимальной температуры оболочки твэлов понизилось на 20 К, а среднеквадратическое отклонение — на 17 К.

Отечественный системный расчетный код (РК) КОРСАР, разработка и совершенствование которого осуществлялись в течение последних 25 лет, все шире используется в проектно-конструкторских организациях для обоснования безопасности ядерных энергетических установок специального назначения и энергоблоков атомных электростанций с ВВЭР, в том числе при сложнейших для численного моделирования авариях LBLOCA [17–19].

Для воспроизведения процессов повторного залива в РК КОРСАР реализована специализированная модель, основанная на модернизации замыкающих соотношений двухжидкостной модели двухфазных потоков [20, 21]. При этом обеспечиваются:

интенсификация теплообмена двухфазного потока с твэлами вблизи фронта смачивания с асимптотическим снижением коэффициента теплообмена по мере удаления от этого фронта до значений, соответствующих дисперсному режиму;

подавление межфазных процессов теплообмена и трения вблизи фронта смачивания введением соответствующих формул для расчета диаметра капель.

Модель была апробирована и уточнена в процессе выполнения трех российских стандартных задач безопасности (с проведением “слепых” претестовых расчетов) по моделированию режимов повторного залива на стендах СВД-1 и СВД-2 [7].

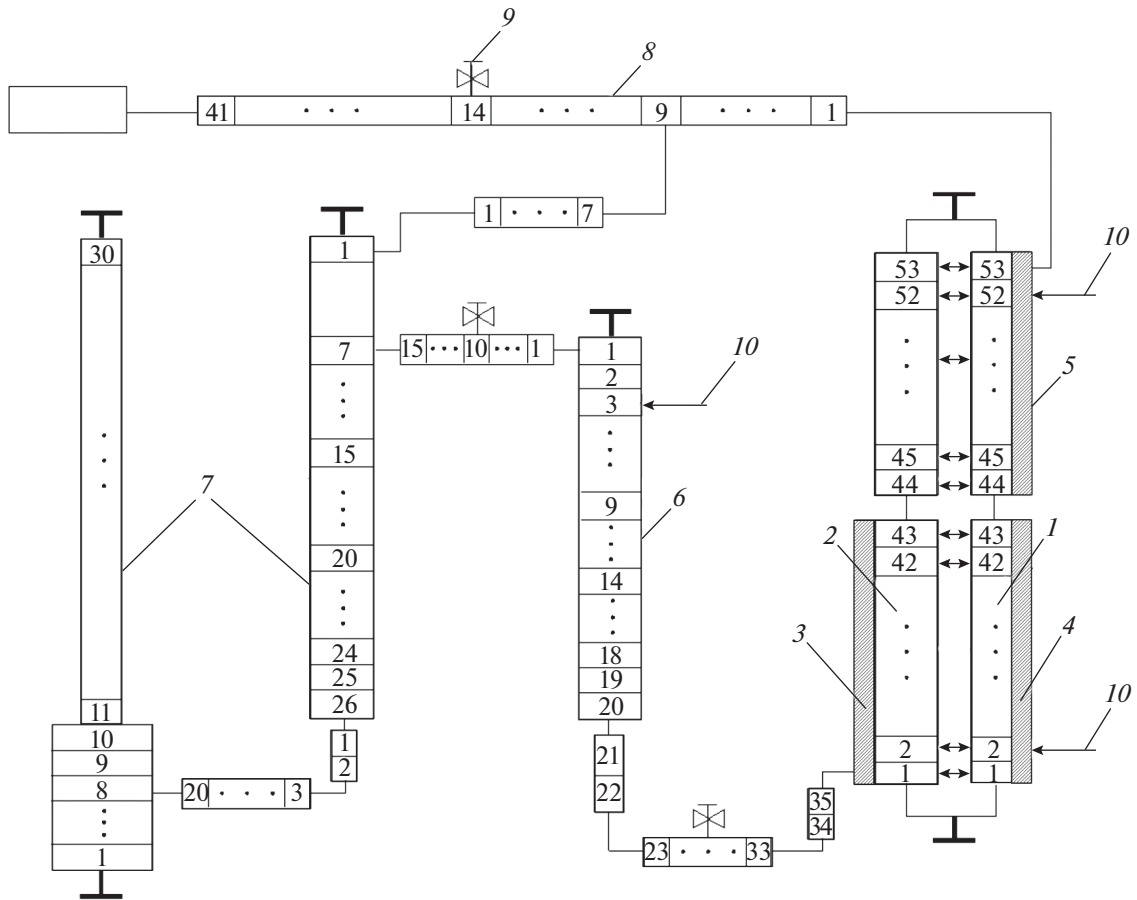


Рис. 2. Расчетная схема стенда ОКБ “Гидропресс” для исследования режимов повторного залива.

1, 2 – экспериментальный участок; 3, 4 – имитаторы твэлов; 5 – корпус экспериментального участка; 6 – модель напорной камеры; 7 – сборный коллектор; 8 – выпускной паропровод; 9 – вентиль; 10 – подача воды. Цифрами на элементах расчетной схемы обозначены номера расчетных ячеек

Статистически значимые результаты по обоснованию (валидации) расчетной модели повторного залива РК КОРСАР были получены в 2022–2023 гг. с использованием экспериментальных данных стенда повторного залива, сооруженного в ОКБ “Гидропресс”.

Описание конструкции стенда повторного залива для крупномасштабной модели ТВС, системы измерений технологических параметров, включая особенности термометрирования имитаторов твэлов, приведено в [9]. Валидация РК КОРСАР была выполнена на основе 45 экспериментов, проведенных на стенде повторного залива при реализации следующих схем подачи охлаждающей воды в предварительно разогретую в паровой среде сборку имитаторов твэлов:

залив модели ТВС снизу;

комбинированный залив (подача воды сверху и снизу);

гравитационный залив (подача воды в верхнюю часть модели кольцевой напорной камеры); комбинированный гравитационный залив.

Следует отметить, что на СПЗ впервые был реализован режим гравитационного залива, когда вода поступает в сборку снизу не с заданным расходом, а под действием столба жидкости, высота которого поддерживалась постоянной, в модели напорной камеры реактора. В этом случае расхолаживание модели ТВС (повторный залив) происходит в условиях, более приближенных к натурным, которые были описаны ранее.

Расчетная схема стенда повторного залива представлена на рис. 2. Экспериментальный участок с моделью ТВС моделируется двумя параллельными каналами 1, 2. В соответствии с имеющимися в РК КОРСАР возможностями расчетные ячейки эквивалентных каналов между собой гидравлически связаны. Центральные (84 шт.) и периферийные (36 шт.) имитаторы

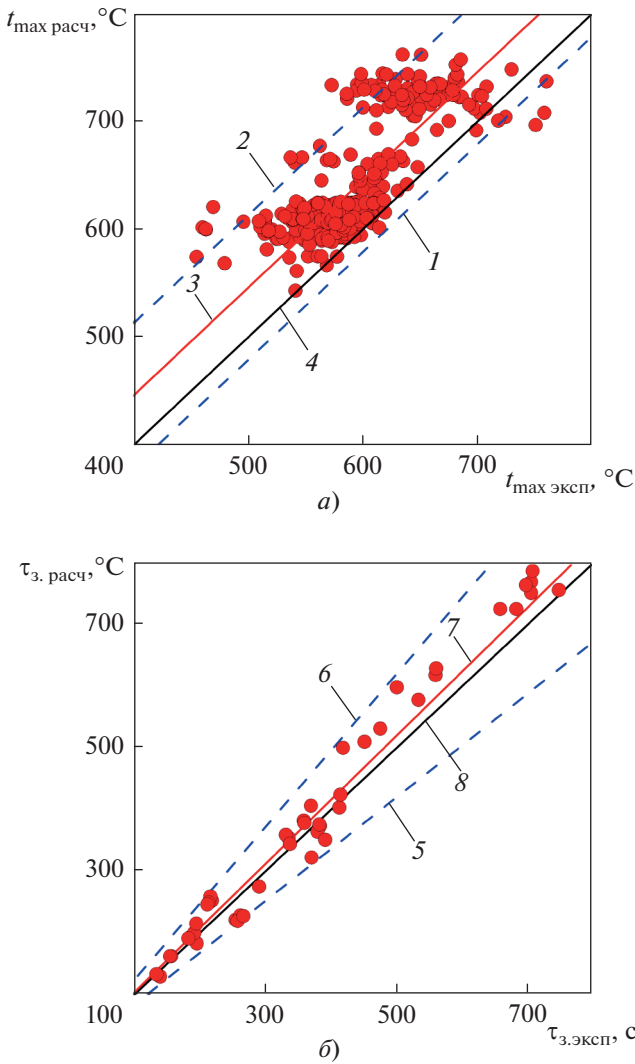


Рис. 3. Сравнение результатов расчета по коду КОРСАР с экспериментальными данными по максимальной температуре твэлов t_{\max} (а) и времени залива τ_z (б) на стенде ОКБ «Гидропресс» в режимах повторного залива, нижняя y_- и верхняя y_+ границы доверительного интервала, среднеарифметическое отклонение $y_{\text{ср}}$.
 1 – $y_- = y_{\text{ср}} - 68.0$; 2 – $y_+ = y_{\text{ср}} + 68.0$; 3 – $y_- = x + 46.0$; 4, 8 – линии совпадения расчетных и экспериментальных значений; 5 – $y_- = y_{\text{ср}} - 2\sigma$; 6 – $y_+ = y_{\text{ср}} + 2\sigma$; 7 – $y_- = 1.04x$

объединены в две эквивалентные теплопроводящие конструкции 3, 4. Протечками в полостях направляющих каналов и центральной трубке пренебрегали [9]. Однако эти трубки в расчетной схеме учтены в виде одной эквивалентной теплопроводящей конструкции. Корпус экспериментального участка представлен в нодализационной схеме теплопроводящей конструкцией 5. Канал 6 воспроизводит процессы в модели напорной камеры реактора. Сборный коллектор, соединенный с верхом модели напорной камеры,

моделируется двумя каналами 7. Трубопровод горячей нитки (выпускного тракта) с моделью вентиля 9 представлен в схеме каналом 8.

Для имитации условий залива снизу задачу решали в приближении задания изменения мощности энерговыделения в сборке имитаторов твэлов и расхода воды с помощью источников подаваемой воды 10 путем табулирования соответствующих экспериментальных данных. При моделировании комбинированного залива на базе экспериментальных данных расходы воды задавали при ее подаче как снизу, так и сверху. Для воспроизведения гравитационного залива вода подавалась в модель напорной камеры 6, излишки воды сливались в сборный коллектор 7. При моделировании комбинированно-гравитационного залива вода дополнительно подавалась в сборную камеру колонки.

Общая картина сопоставления расчетных и экспериментальных данных по ключевым параметрам повторного залива: максимальной температуре имитаторов твэлов в девяти сечениях по высоте активной зоны для каждого эксперимента согласно [9] и общему времени залива сборки – представлена на рис. 3. На рис. 4, 5 для сравнения приведены расчетные значения технологических параметров и экспериментальные данные для двух режимов повторного залива – снизу и гравитационного.

Как следует из представленных на рис. 5 данных, при гравитационном заливе реализуется предсказанный ранее [22] неустойчивый режим поступления воды в сборку, характеризующийся пульсациями массового уровня манометрического типа, в свою очередь, возбуждаемыми неустойчивой генерацией пара в затопленной части сборки имитаторов твэлов. Приведенные результаты свидетельствуют о том, что расчетная модель, построенная на основе РК КОРСАР, в целом адекватно воспроизводит это явление.

Количество экспериментов по повторному заливу на СПЗ позволяет выполнить статистическую обработку различающихся расчетных и экспериментальных данных Δ_i как по максимальной температуре имитаторов твэлов $\Delta_i = t_{\max \text{ расч}} - t_{\max \text{ эксп}}$, так и по времени залива $\Delta_i = (\tau_{z, \text{ расч}} - \tau_{z, \text{ эксп}}) / \tau_{z, \text{ эксп}}$, используя известные соотношения для расчета математического ожидания

$$E = \bar{\Delta} = \frac{\sum_{i=1}^N \Delta_i}{N}$$

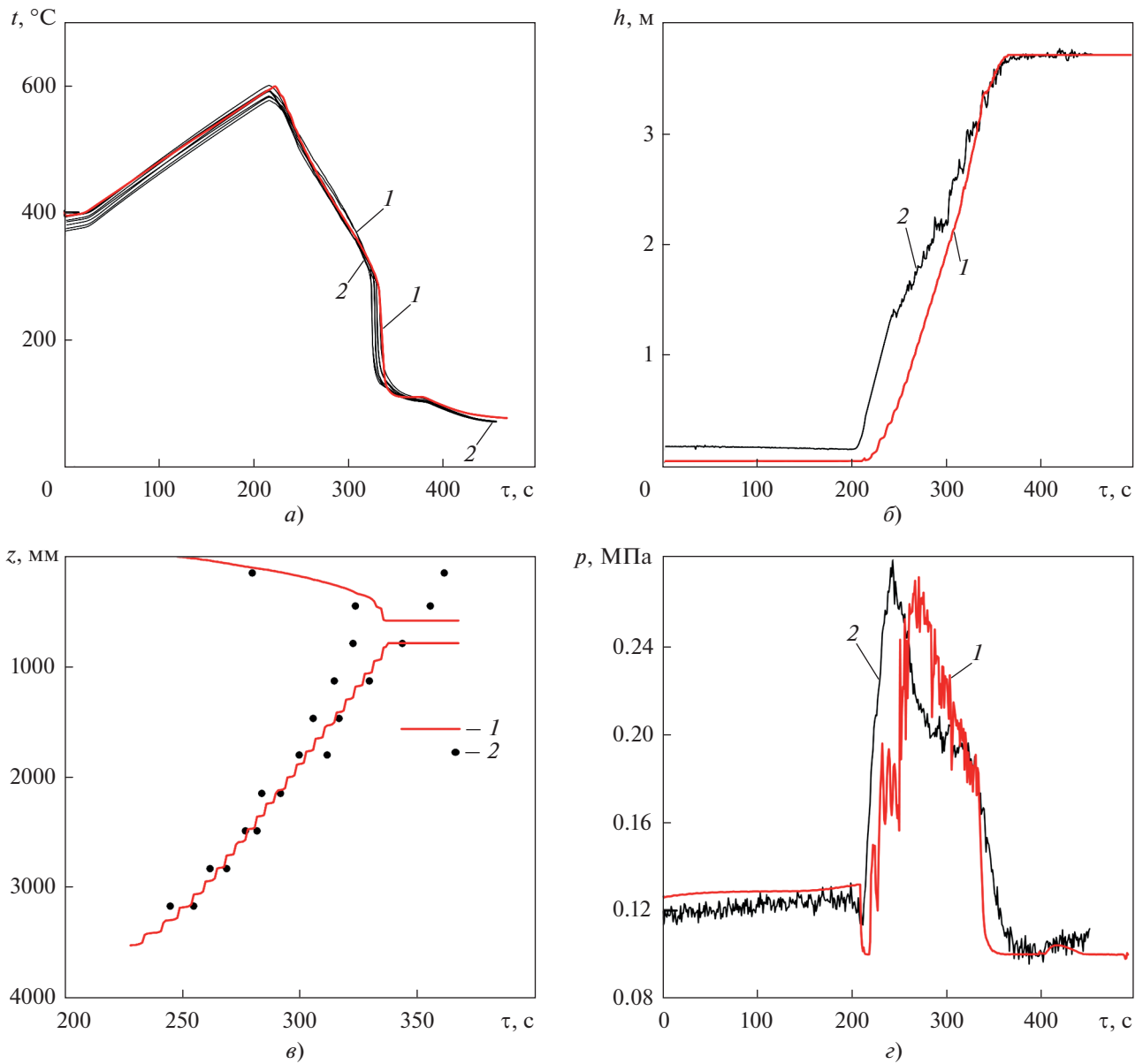


Рис. 4. Изменение во времени технологических параметров в модели ТВС СПЗ при нижнем заливе. *a* – температура внутренней поверхности оболочки имитатора твэла *t* на расстоянии 790 мм от верха модели ТВС; *б* – массовый уровень *h*; *в* – движение фронта смачивания *z*; *г* – давление *p* на выходе из модели ТВС; *1* – результаты расчетов; *2* – экспериментальные данные

и среднеквадратического отклонения

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\Delta_i - \bar{\Delta})^2}{N - 1}},$$

где $\bar{\Delta}$ – среднеарифметическое отклонение; *N* – число экспериментов, равное 45.

Статистический анализ также показал наличие нормального закона распределения различий между расчетными и экспериментальными дан-

ными Δ_i . После статистической обработки были получены следующие результаты:

для t_{\max} $E = 46^\circ\text{C}$, $\sigma = 34^\circ\text{C}$;

для τ_3 $E = 4\%$, $\sigma = 10\%$.

С доверительной вероятностью 95% диапазоны неопределенностей, рассчитанные по зависимости $E \pm 2\sigma$, составят:

по максимальной температуре имитаторов твэлов $[-22^\circ\text{C}; 114^\circ\text{C}]$;

по времени залива сборки $[-16\%; 24\%]$.

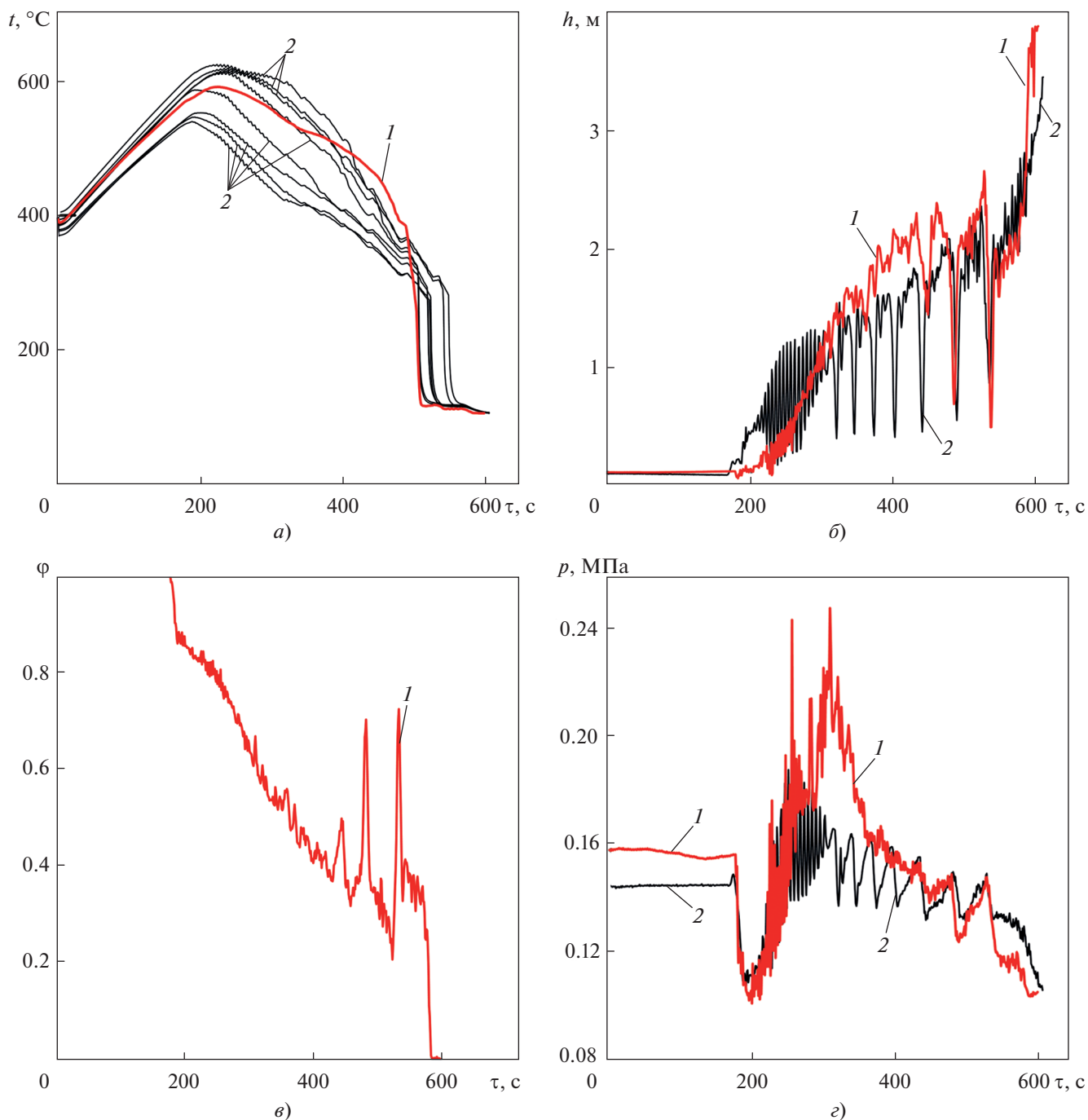


Рис. 5. Изменение во времени технологических параметров в модели ТВС СПЗ при гравитационном заливе. *а* – температура внутренней поверхности оболочки имитатора твэла t на расстоянии 450 мм от верха модели ТВС; *б* – массовый уровень h ; *в* – среднее паросодержание φ ; *г* – давление p на выходе из модели ТВС; *1* – результаты расчетов; *2* – экспериментальные данные

ВЫВОДЫ

1. Согласно результатам статистической обработки данных, использованных для валидации расчетного кода КОРСАР на основе статистически значимой совокупности экспериментов, проведенных на стенде повторного залива с крупно-

масштабной моделью ТВС в ОКБ “Гидропресс” при различных схемах подачи охлаждающей воды, математическое ожидание отклонений результатов расчета от эксперимента по максимальной температуре имитаторов твэлов составляет 46°C (среднеквадратическое отклонение 34°C),

по времени залива -4% (среднеквадратическое отклонение 10%).

2. Расчетный код КОРСАР адекватно воспроизводит явление гравитационного залива тепловыделяющей сборки, характеризующегося низкочастотными колебаниями массового уровня воды.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Kervinen T., Purhonen H., Kalli H.** REWET-II experiments to determine the effects of spacer grids on the reflooding process // Proc. 5th Int. Meet. on Thermal Nuclear Reactor Safety. Germany, Karlsruhe, 09–13 Sept. 1984.
2. **Results** of the QUENCH 12 experiment on reflood of a VVER-type bundle / J. Stuckert, A. Goryachev, M. Große, M. Heck, I. Ivanova // FZKA 7307. 2008.
3. **Ihle P., Rust K.** FEBA – Flooding experiments with blocked arrays. Data report 1, test series I through IV. KfK Karlsruhe, 1984.
<https://doi.org/10.5445/IR/270019697>
4. **RBHT** reflood heat transfer experiments data and analysis / L.E. Hochreiter, Fan-Bill Cheung, T.F. Lin, J.P. Spring, S. Ergun, A. Sridharan, A. Ireland, E.R. Rosal // NUREG/CR 6980. 2012.
5. **Sobajima M.** Spray cooling test. A separate effect test with ROSA-III a BWR-LOCA simulation facility // J. Nucl. Sci. Technol. 1981. V. 18. No. 8. P. 629–631.
<https://doi.org/10.1080/18811248.1981.9733298>
6. **Iguchi T., Okubo T., Muraо Y.** Visual study of flow behavior in upper plenum during simulated reflood phase of PWR-LOCA // J. Nucl. Sci. Technol. 1983. V. 20. Is. 8. P. 698–700.
<https://doi.org/10.1080/18811248.1983.9733451>
7. **Сегреев В.В.** Теплообмен в закризисной зоне парогенерирующих каналов и теплогидравлика ТВС в переходных и аварийных режимах: дис. ... докт. техн. наук. ГНЦ РФ-ФЭИ, 2007.
8. **The behavior** modeling of 37 rod fuel assembly with Zr 1%–Nb alloy cladding under LOCA conditions at PARAMETER facility / 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 // Proc. of the 5th Intern. Conf. on WWER Fuel Exploitation, Modeling, and Experimental Investigation. Bulgaria, 29 Sept.–3 Oct. 2005.
9. **Экспериментальные** исследования охлаждения активной зоны в аварии “большая течь” на стадии повторного залива / А.Н. Чуркин, А.Г. Каретников, М.А. Быков, А.С. Богданов, Ю.А. Безруков // Теплоэнергетика. 2025. № 4. С. 39–50.
<https://doi.org/10.56304/S0040363624600976>
10. **РБ-166-20.** Рекомендации по оценке погрешностей и неопределенностей результатов расчетных анализов безопасности атомных станций. М.: Федеральная служба по экологическому, технологи-
- ческому и атомному надзору, 2020.
<https://docs.secncrs.ru/catalog/regulations/>
11. **Смолин В.Н., Шишов В.П., Мокроусов К.А.** Обзор экспериментальных результатов верхнего залива на сборках и задачи дальнейших исследований // Теплоэнергетика. 2002. № 7. С. 54–58.
12. **Kovtonyuk A., Petrucci A., D'Auria F.** Post-BEMUSE Reflood Model Input Uncertainty Methods (PREMIUM) benchmark. Phase II: Identification of influential parameters. No. NEA-CSNI-R-2014-14. Organisation for Economic Co-Operation and Development. 23 Feb. 2015. NEA/CSNI/R(2014)14.
13. **Skorek T.** Description of FEBA test facility and FEBA/SEFLEX experimental program. OECD/NEA PREMIUM benchmark. Germany, GRS, Okt. 2012.
14. **Анализ** явлений во время повторного залива активной зоны ВВЭР. Ч. 2 / Ю.А. Безруков, В.И. Щеколдин, С.И. Зайцев, А.Н. Чуркин // Тяжелое машиностроение. 2015. № 3–4. С. 19–23.
15. **Park J.H., Jeong Y.H.** Modeling of droplet diameter changes during reflood into RELAP5/Mod3.3 // Nucl. Eng. Des. 2022. V. 393. P. 111791.
<https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2022.111791>
16. **Experimental** investigation of droplet transient behavior during reflood cooling process of single-rod channel / M. Chen, D. Chen, H. Liu, L. Zhong, J. Deng // Int. J. Therm. Sci. 2023. V. 195. P. 108667.
<https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2023.108667>
17. **Опыт** применения и развития расчетного кода КОРСАР для обоснования безопасности АЭС с ВВЭР / Ю.Г. Драгунов, М.А. Быков, В.А. Василенко, Ю.А. Мигров // Теплоэнергетика. 2006. № 1. С. 43–47.
18. **Паршиков И.А., Соловьев Д.С., Соловьев С.Л.** Расчетный анализ аварийных режимов реакторной установки с использованием теплогидравлического кода КОРСАР // Изв. вузов. Ядерная энергетика. 2014. № 2. С. 15–26.
19. **Суслов М.В., Петкевич И.Г., Увакин М.А.** Обоснование процедуры расхолаживания РУ ВВЭР-1200 в условиях обесточивания с помощью ПК КОРСАР/ГП // Технологии обеспечения жизненного цикла ядерных энергетических установок. 2019. № 1 (15). С. 32–44.
20. **Юдов Ю.В., Волкова С.Н., Мигров Ю.А.** Замыкающие соотношения теплогидравлической модели расчетного кода КОРСАР // Теплоэнергетика. 2002. № 11. С. 22–29.
21. **Верификация** модели закризисного теплообмена теплогидравлического кода КОРСАР / А.А. Веремеев, А.А. Ивашкевич, И.П. Смогалева, В.Н. Виноградов // Теплоэнергетика. 2002. № 11. С. 66–70.
22. **Ghaiaasiaan S.M.** Bottom reflooding of pressurized water reactors. Part II: Oscillatory flow during gravity-feed reflooding // Nucl. Eng. Des. 1988. V. 81. Is. 1. P. 28–38.
<https://doi.org/10.13182/NT88-A34076>

Computational and Experimental Studies of Reflooding Processes in a Large-Scale Model of a VVER Fuel Assembly

M. A. Bykov^{a, *}, Yu. A. Migrov^b, M. V. Sazontova^b, and A. N. Churkin^a

^a AO OKB Gidropress, Podolsk, 142103 Russia

^b Federal State Unitary Enterprise Alexandrov Research Institute of Technology (FGUP NITI), Sosnovy Bor, 188540 Russia

*e-mail: bykov@grpress.podolsk.ru

Abstract—The paper presents a brief review of experimental and computational studies of the reflooding processes occurring during large break LOCAs in the primary circuits with subsequent supply of the coolant in pressurized water-moderated water-cooled power reactors (VVER). The results of the PREMIUM project, carried out by OECD (CSNI), on the assessment of the prediction of reflooding parameters using the most well-known computational codes (RELAP5, CATHARE, ATHLET, APROS, MARS) are analyzed. The calculations were performed using data from one of the experimental regimes simulated at the FEBA test facility (Germany) for reflooding simulation. It is stated that the uncertainty of the estimate of the maximum temperature of fuel rods obtained by known system computational codes can attain 100°C as follows from the results of validation calculations. Based on a statistically significant set of experiments conducted on a unique reflooding test facility at OKB Gidropress with several cooling water supply options, the domestic KORSAR computational code was validated, including the gravity reflooding when water is supplied to the upper part of the reactor pressure plenum model. It has been demonstrated that the KORSAR code is not poorer than the best foreign equivalents in terms of the accuracy of the predicted maximum temperature of fuel-rod simulators and flooding time for the experimental fuel assembly.

Keywords: reflooding, experiment, calculation, code validation, error estimation, fuel assembly, large leak, KORSAR software package