

УДК 621.039

**ВАЛИДАЦИЯ КОДА HYDRA-IBRAE/H<sub>2</sub>O НА ИНТЕГРАЛЬНЫХ  
ЭКСПЕРИМЕНТАХ НА СТЕНДАХ ИСБ-ВВЭР И ПСБ-ВВЭР**© 2019 г. И. Н. Дробышевская<sup>1, \*</sup>, Н. А. Мосунова<sup>1</sup>, С. С. Пылев<sup>1</sup>, С. В. Цаун<sup>1</sup><sup>1</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем безопасного развития атомной энергетики Российской академии наук, Москва, Россия

\*e-mail: drob@ibrae.ac.ru

Поступила в редакцию 31.08.2019 г.

После доработки 21.10.2019 г.

Принята к публикации 23.10.2019 г.

В работе представлены результаты валидационных расчетов интегральных экспериментов на стендах ИСБ-ВВЭР и ПСБ-ВВЭР, выполненных по системному теплогидравлическому коду HYDRA-IBRAE/H<sub>2</sub>O. Код HYDRA-IBRAE/H<sub>2</sub>O является современным программным средством для численного моделирования теплогидравлических процессов в реакторных установках технологии ВВЭР. Рассмотрены авария с малой течью 2.4% из верхней камеры смешения на стенде ИСБ-ВВЭР и авария с большой течью из горячего трубопровода при имитации двухстороннего истечения на стенде ПСБ-ВВЭР. Приведены основные положения методики проведения расчетов и оценки погрешностей, а также краткое описание стендов, сценарии выбранных режимов, основные характеристики разработанных расчетных моделей (нодализационных схем). Представлены результаты и погрешности расчетов по методике, разработанной в ИБРАЭ РАН и учитывающей неопределенности входных данных, математических моделей и вычислительные неопределенности.

*Ключевые слова:* HYDRA-IBRAE/H<sub>2</sub>O, валидация, интегральный стенд, малая течь, большая течь, ВВЭР, авария с потерей теплоносителя, системный теплогидравлический код, анализ неопределенностей

DOI: 10.1134/S0002331019050042

**ВВЕДЕНИЕ**

Системный теплогидравлический расчетный код улучшенной оценки HYDRA-IBRAE/H<sub>2</sub>O ориентирован на моделирование нестационарных теплогидравлических процессов в контурах реакторных установок с водяным теплоносителем (технологии ВВЭР) в режимах нормальной эксплуатации и нарушений нормальной эксплуатации. Код также позволяет моделировать теплогидравлические стенды и отдельные элементы оборудования, в том числе с учетом поведения неконденсируемых газов. Код разработан в ИБРАЭ РАН в рамках проекта по созданию программно-технического комплекса “Виртуально-цифровая АЭС с ВВЭР”, задачей которого является адекватное воспроизведение всех ключевых режимов и процессов на АЭС с реакторными установками ВВЭР при нормальной эксплуатации, нарушениях нормальной эксплуатации, включая тяжелые аварии [1].

Моделирование теплогидравлических процессов в базовой версии кода, рассматриваемой в данной работе, осуществляется на основе неравновесной двухжидкостной

модели в одномерном приближении. В коде реализовано решение системы линейаризованных алгебраических уравнений, выражающих законы сохранения массы, энергии и импульса: по три уравнения сохранения для водяной и газовой фаз.

Для подтверждения адекватного воспроизведения процессов, протекающих при работе реакторных установок, необходимо валидировать код на экспериментах, которые можно укрупненно разбить на две группы: эксперименты по изучению отдельных процессов и явлений и интегральные эксперименты. Как следует из названия, первая группа экспериментов нацелена на исследования ключевых процессов и явлений, протекающих в двухфазных средах, или исследует локальные явления важные с точки зрения безопасности АЭС. Вторая группа предназначена для исследования взаимосвязанных явлений, реализуемых в реакторных установках. Набор важных для проверки явлений и экспериментов зависит от конкретного типа реакторной установки и рассматриваемых режимов работы этой установки, применительно к которым валидируется код. Все эти аспекты отражаются в наглядном виде в матрице верификации и валидации расчетного кода.

Для верификации и валидации кода HYDRA-IBRAE/H<sub>2</sub>O применительно к реакторным установкам с ВВЭР-1000 и ВВЭР-1200 была разработана матрица верификации и валидации, включающая всю вышеуказанную информацию. Матрица основана на рекомендациях ОЭСР и МАГАТЭ [2].

В настоящей работе представлены результаты валидации кода HYDRA-IBRAE/H<sub>2</sub>O на экспериментах, проведенных на интегральных стендах ИСБ-ВВЭР и ПСБ-ВВЭР. Оба стенда широко известны и эксперименты, проведенные на них, неоднократно привлекались для валидации теплогидравлических кодов [3], [4], [5].

## 1. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ РАСЧЕТОВ И ОЦЕНКИ ПОГРЕШНОСТЕЙ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

При моделировании эксперимента пользователь расчетного кода неминуемо сталкивается с рядом неопределенностей, например, неопределенностями входных данных, математических моделей, используемых для описания различных физических процессов, зависимостей, полученных эмпирическим путем, для замыкания уравнений, подготовленной расчетной модели (нодализационной схемы), неопределенностями, связанными с квалификацией пользователя и другими факторами. Неопределенности, связанные с расчетной моделью, минимизируются с использованием процедуры квалификации нодализационной схемы [6], цель которой – демонстрация того, что используемая расчетная модель адекватно воспроизводит поведение экспериментального стенда как в стационарном, так и переходном режимах. На первом этапе оценивается точность воспроизведения геометрических параметров стенда в разработанной модели. На втором этапе проводится стационарный расчет. Критерием установления стационара считается условие, при котором все основные параметры стенда в расчете изменяются не более чем на 1% за 100 с физического времени процесса. На третьем этапе проводятся расчеты переходного режима, по результатам которых оценивается качественное и количественное соответствие рассчитанных параметров экспериментальным значениям.

Для получения количественной оценки неопределенностей результатов расчета проводятся многовариантные расчеты переходного режима с варьированием экспертно определенного набора параметров в заданном диапазоне значений. Например, давления теплоносителя первого контура, давления и расхода питательной воды второго контура, начальных температур теплоносителя и питательной воды, неопределенностей эмпирических корреляций для расчета теплообмена фаз со стенками канала и между собой, трения фаз со стенками и межфазного трения, используемых в коде. По-

дробно методика оценки неопределенностей результатов расчета, учитывающая неопределенности входных данных, математических моделей и вычислительные неопределенности, используемая при валидации кода HYDRA-IBRAE/H<sub>2</sub>O, представлена в работе [7].

Многовариантные расчеты, результаты которых приведены в данной статье, выполнялись в автоматизированном режиме с использованием разработанного в ИБРАЭ РАН программного средства VARIA [8].

## 2. МОДЕЛИРОВАНИЕ МАЛОЙ ТЕЧИ 2.4% ИЗ ВЕРХНЕЙ КАМЕРЫ СМЕШЕНИЯ НА СТЕНДЕ ИСБ-ВВЭР

Интегральный теплофизический стенд ИСБ-ВВЭР, расположенный в ЭНИЦ (г. Электрогорск), имитирует первый циркуляционный контур реакторной установки типа ВВЭР-1000. Масштаб стенда по высотным отметкам составляет 1 : 1, по объемно-мощностным – 1 : 3000. Контур состоит из двух петель, аварийной и неаварийной, которые замыкаются на модель реактора, в состав которой входят опускной участок (ОУ) – имитирует кольцевой опускной участок и нижнюю камеру смешения реактора, модель активной зоны (рабочий участок – РУ) с девятнадцатью электрообогреваемыми имитаторами твэл натурной длины, верхняя камера смешения (ВКС) и байпасный участок (БУ) для моделирования протечек мимо активной зоны. Каждая петля оснащена холодным и горячим трубопроводами и циркуляционным насосом (ЦЭН), расположенным на байпасах к холодному трубопроводу петлей. В аварийной петле подключен один парогенератор (ПГ), в неаварийной – три, параллельно. Также на стенде имеются компенсатор давления (КД) с возможностью подключения в холодному и горячему трубопроводам, система аварийного охлаждения активной зоны (CAOЗ) высокого и низкого давления, гидроемкости и система сбора вытекающего из контура теплоносителя. Компоновка стенда представлена на рис. 1.

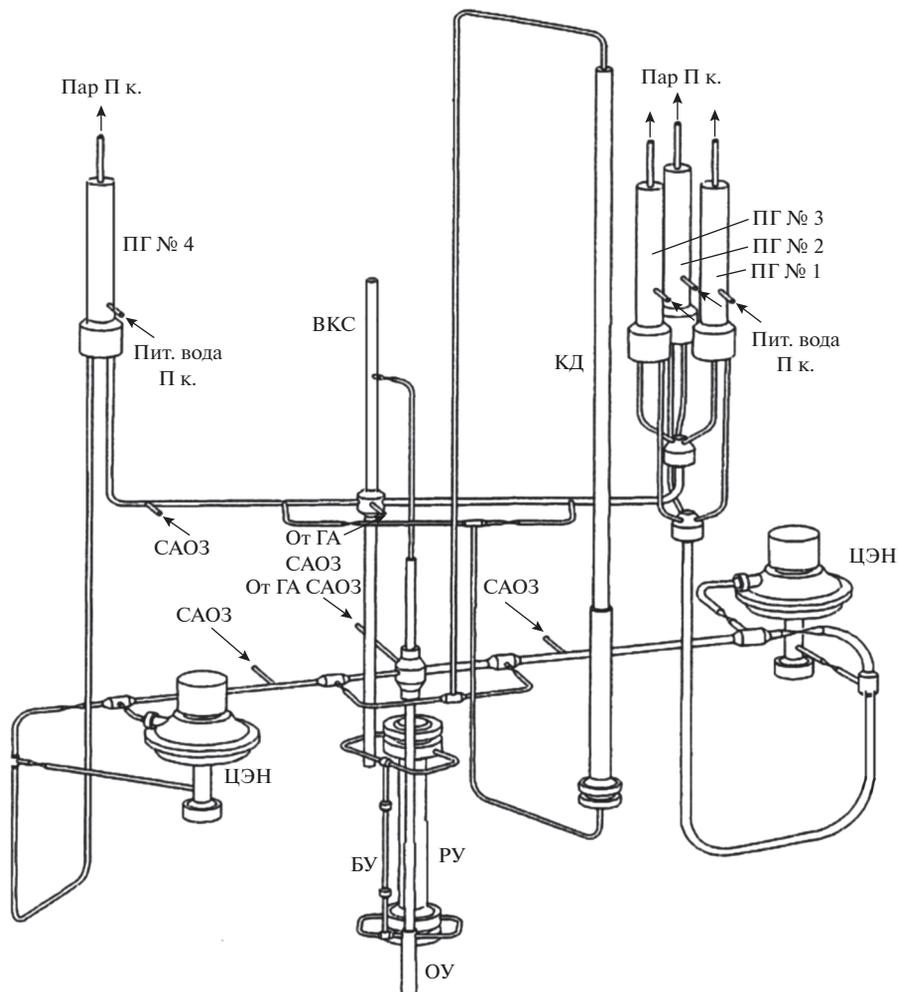
Для валидации кода HYDRA-IBRAE/H<sub>2</sub>O был выбран эксперимент, проведенный в рамках первой Российской стандартной проблемы безопасности (СПБ-1). В этом эксперименте имитируется частичный разрыв трубопровода CAOЗ из выходной камеры реактора (малая течь 2.4%) с последующим отключением циркуляционных насосов, без подачи охлаждающей воды из CAOЗ [9].

Эксперимент проходил по следующему сценарию. В момент времени  $\tau = 0$  с происходило открытие линии течи, перед этим в стенде поддерживалось стационарное состояние в течение около 1.5 ч. Через 9 с после открытия течи электрическая нагрузка на имитаторах твэл начала снижаться с номинального значения до величины остаточного тепловыделения по определенному закону. В это же время подавался сигнал на сброс пара из парогенераторов и отключение линии подачи питательной воды. Циркуляционные насосы отключались на 14-й с после открытия течи. Компенсатор давления был подключен к горячему трубопроводу аварийной петли, нагреватель КД отключился автоматически при снижении уровня воды ниже 3.83 м. Эксперимент закончился отключением электрической нагрузки с имитаторов твэл и байпасного участка при достижении температурой стенки имитаторов твэл 450°C.

Нодализационная схема стенда, построенная для проведения расчетов по коду HYDRA-IBRAE/H<sub>2</sub>O, приведена на рис. 2.

Верхняя камера смешения и опускной участок соединяются с каналом с имитаторами твэл и байпасным участком с помощью присоединительных трубопроводов. Из верхней камеры смешения теплоноситель попадает в горячий трубопровод аварийной (на рис. 2 слева) и неаварийной петлей.

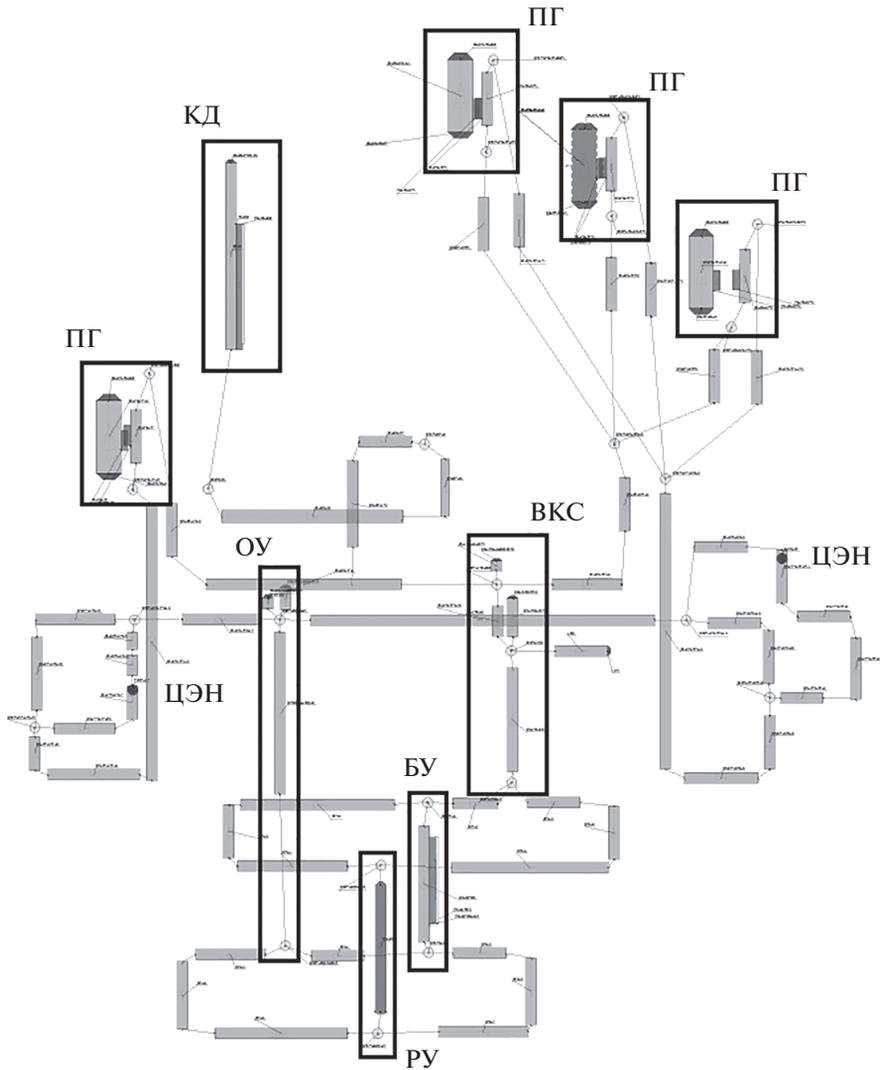
Парогенераторы аварийной и неаварийной петлей имеют одинаковую нодализацию. По второму контуру каждый парогенератор моделируется одним гидравлическим каналом с заданными граничными условиями по расходу питательной воды (на



РУ – Рабочий участок (канал со сборкой имитаторов твэл);  
 БУ – Байпасный участок; ОУ – Опускной участок;  
 ВКС – Верхняя камера смешения; ПГ – Парогенератор;  
 КД – Компенсатор давления; ЦЭН – Циркуляционный насос;  
 САОЗ – Система аварийного охлаждения зоны; ГА САОЗ – Гидроаккумулятор системы аварийного охлаждения зоны

**Рис. 1.** Компоновка интегрального стенда ИСБ-ВВЭР.

входе) и давлению (на выходе). Холодный трубопровод аварийной и неаварийной петли связан с опускным участком. Циркуляционные насосы расположены на байпасах к холодному трубопроводу аварийной и неаварийной петли. К горячему трубопроводу аварийной петли подключен компенсатор давления. Всего в нодализационной схеме используется 67 каналов, которые суммарно разбиты на несколько тысяч расчетных ячеек. Разбиение на ячейки выполнено таким образом, чтобы длина расчетных ячеек была приблизительно одинаковой во всем контуре.



РУ – Рабочий участок (канал со сборкой имитаторов твэл);  
 БУ – Байпасный участок; ОУ – Опускной участок; ВКС – Верхняя  
 камера смешения; ПГ – Парогенератор; КД – Компенсатор давления;  
 ЦЭН – Циркуляционный насос; ХТ-АП (ХТ-НП) – Холодный  
 трубопровод аварийной (неаварийной) петли; ГТ-АП (ГТ-НП) – Горячий  
 трубопровод аварийной (неаварийной) петли

Рис. 2. Нодализационная схема стенда ИСБ-ВВЭР.

Модель активной зоны задается специальным элементом, разработанным для упрощения задания входных данных для моделирования зоны, и обладает следующими характеристиками:

- 200 ячеек по высоте элемента;
- проходное сечение  $0.001467 \text{ м}^2$ ;

**Таблица 1.** Сравнение геометрических параметров стенда и расчетной модели

№	Параметр	$Y_e$	$Y_c$	$E, \%$	Допустимый уровень $E, \%$ [6]
1	Объем верхней камеры смешения, $\text{дм}^3$	15.82	15.67	0.9	<1
2	Объем опускного участка, $\text{дм}^3$	7.59	7.56	0.40	<1
3	Объем рабочего участка, $\text{дм}^3$	10.96	11.06	0.91	<1
4	Объем байпасного участка, $\text{дм}^3$	0.749	0.749	0	<1
5	Объем компенсатора давления, $\text{дм}^3$	27	26.9	0.37	<1
6	Объем парогенератора по первому контуру, $\text{дм}^3$	6.81	6.82	0.15	<1
7	Объем холодного трубопровода аварийной петли, $\text{дм}^3$	6.67	6.62	0.75	<1
8	Объем холодного трубопровода неаварийной петли, $\text{дм}^3$	18.96	19.04	0.42	<1
9	Объем горячего трубопровода аварийной петли, $\text{дм}^3$	1.583	1.583	0	<1
10	Объем горячего трубопровода неаварийной петли, $\text{дм}^3$	7.209	7.210	0.01	<1
11	Объем присоединительных трубопроводов, $\text{дм}^3$	1.565	1.565	0	<1
12	Площадь теплообменной поверхности трубного пучка парогенератора, $\text{м}^2$	2.0504	2.05	0.02	<0.1
13	Площадь теплообменной поверхности твэл, $\text{м}^2$	1.92	1.92	0	<0.1

- гидравлический диаметр 0.0109 м;
- общая длина 4.890 м;
- количество имитаторов твэл – 19.

Имитаторы твэл в аксиальном направлении разделены на 3 области:

- 1-я область – без тепловыделения, материал – сталь X18H10T, высота участка от 0 до 0.61 м, 25 расчетных ячеек;
- 2-я область – с тепловыделением, материал – сталь X18H10T, высота участка от 0.61 до 4.14 м, 141 расчетная ячейка;
- 3-я область – без тепловыделения, материал – сталь X18H10T, высота участка от 4.14 до 4.89 м, 34 расчетных ячейки.

Для разработанной нодализационной схемы было продемонстрировано, что отличия между геометрией реальных элементов экспериментального стенда и созданной моделью находятся ниже допустимого уровня. Ошибка  $E$  рассчитывалась по следующей формуле:

$$E = 100 \frac{|Y_e - Y_c|}{Y_e},$$

где  $Y_e$  – значение, соответствующее реальному элементу стенда,  $Y_c$  – значение, соответствующее разработанной модели. Допустимые величины  $E$ , зависящие от рассматриваемого элемента, были взяты из [6]. Полученные результаты сравнения представлены в табл. 1.

Стационарное состояние стенда перед внесением возмущения, то есть открытием узла течи, представлено в табл. 2. В таблице приведены как экспериментальные значения, так и рассчитанные по коду HYDRA-IBRAE/H<sub>2</sub>O. Продолжительность стационарного расчета – 1000 с, за которые основные параметры расчета изменялись максимум на 0.6%.

Моделирование переходного процесса выполнено с использованием технологии многовариантных расчетов, в которых варьировался набор экспертно определенных

**Таблица 2.** Сравнение экспериментальных и расчетных параметров для стационарного состояния

Параметр	ИСБ-ВВЭР [9]	Расчет
Первый контур		
Давление на выходе из ВКС, МПа	15.9	15.9
Температура воды на входе в канал со сборкой имитаторов твэл, К	570	569
Температура на выходе из ВКС, К	600	599
Расход теплоносителя в неаварийной петле, кг/с	3.33	3.34
Расход теплоносителя в аварийной петле, кг/с	1.10	1.12
Уровень в компенсаторе давления, м	7	7
Второй контур		
Давление в ПГ, МПа	6.25	6.25
Уровень в ПГ, м	1.66	1.66

**Таблица 3.** Диапазоны варьирования параметров

№	Параметр	Диапазон варьирования	Вид распределения
1	Давление в первом контуре, МПа	$\pm 0.17$	Равномерное
2	Давление во втором контуре, МПа	$\pm 0.085$	Равномерное
3	Начальная температура теплоносителя, К	$\pm 3.8$	Равномерное
4	Начальная температура питательной воды, К	$\pm 3.8$	Равномерное
5	Расход питательной воды, кг/с	$\pm 0.12$	Равномерное
6	Погрешность корреляции по расчету трения со стенкой	$\pm 30\%$	Равномерное
7	Погрешность корреляции по расчету межфазного трения	$\pm 30\%$	Равномерное
8	Погрешность корреляции по расчету теплообмена со стенкой	$\pm 30\%$	Равномерное
9	Погрешность корреляции по расчету межфазного теплообмена	$\pm 30\%$	Равномерное

параметров в заданных диапазонах. Набор варьируемых параметров выбран на основании анализа результатов проведенных ранее расчетов экспериментов по отдельным явлениям, которые позволили определить перечень ключевых параметров, влияющих на результаты моделирования. Пределы варьирования основаны на погрешностях измерительных приборов и погрешностях корреляций, заложенных в код HYDRA-IBRAE/H2O. Перечень варьируемых параметров, диапазоны варьирования и вид функции распределения представлены в табл. 3.

Начало аварийного процесса после открытия течи характеризовалось быстрым падением давления в контуре за счет истечения теплоносителя в разрыв. На 14-й с аварийного процесса был подан сигнал на отключение циркуляционных насосов, после чего началось снижение расхода в петлях. На рис. 3 приведено сравнение расходов в петлях в расчете и эксперименте. Здесь и далее результаты приводятся в виде коридора неопределенности расчетной величины (штрихованные кривые), который представляет собой огибающие всех проведенных многовариантных расчетов и средней величины, определенной на основании всех многовариантных расчетов.

Несмотря на резкое падение расхода в петлях, электрическая нагрузка на имитаторах твэл оставалась высокой, что привело к росту температуры теплоносителя в горя-

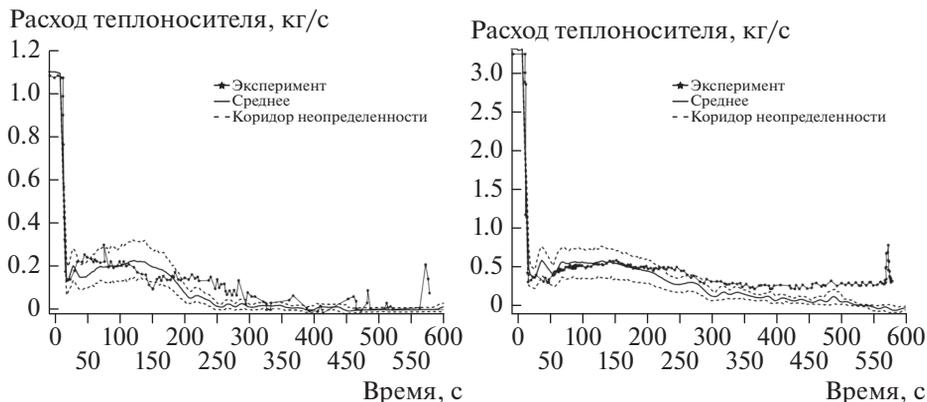


Рис. 3. Расход теплоносителя в аварийной (слева) и неаварийной (справа) петлях.

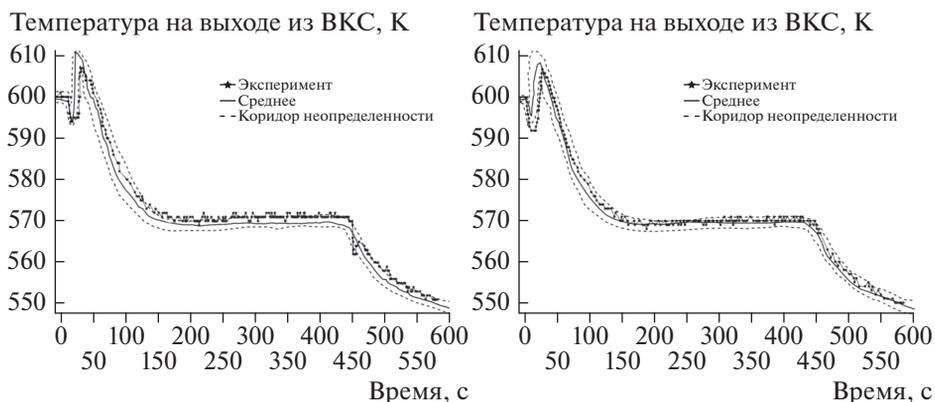


Рис. 4. Температура теплоносителя на выходе из ВКС в аварийную (слева) и неаварийную (справа) петлю.

чих трубопроводах обеих петель. Сравнение температур теплоносителя на выходе из верхней камеры смешения в аварийную и неаварийную петлю представлено на рис. 4.

За счет снижения расхода в петлях также было зафиксировано падение температуры воды в парогенераторах, которые еще работали в режиме теплосъема. Сравнение температур теплоносителя на входе и выходе в ПГ аварийной петли приведено на рис. 5. Графики температур в остальных парогенераторах не приводятся в силу того, что качественно они повторяют представленные зависимости.

Появление пара в эксперименте было зафиксировано на 20-й с в горячем трубопроводе аварийной петли на входе в парогенератор, в расчете пар на входе в парогенератор начинает появляться с 26-й с.

В результате моделирования показано, что код HYDRA-IBRAE/H<sub>2</sub>O позволяет корректно моделировать следующие взаимосвязанные процессы: истечение через разрыв, сепарация фаз, перемешивание и конденсация во время впрыска, конденсация пара в парогенераторе со стороны первого контура, двухфазное течение в парогенераторе со стороны первого и второго контуров, распределение паросодержания и потоков в активной зоне, образование водяного объема в верхней камере смешения; теплопередача в активной зоне, включая кризис теплоотдачи, осушение, возврат к пузырьковому кипению и другие. Выполненный анализ чувствительности с использованием коэффи-

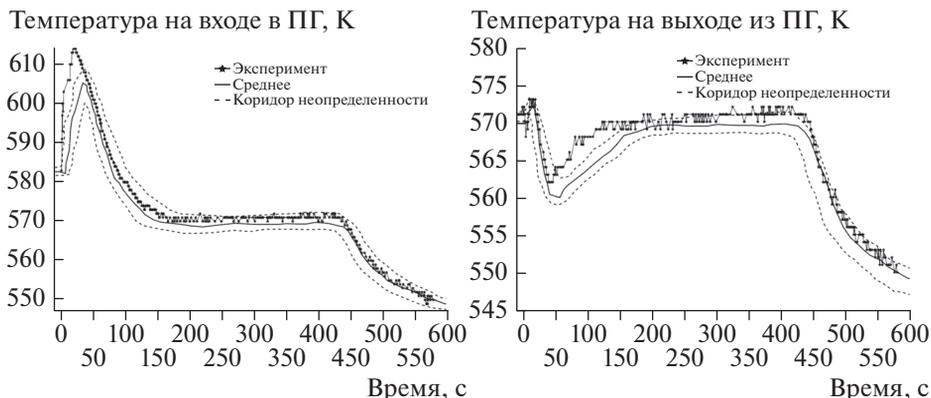


Рис. 5. Температура теплоносителя на входе (слева) и выходе (справа) в парогенератор аварийной петли.

циентов корреляции рангов показал, что ключевыми параметрами, определяющими результаты расчета, являются неопределенности корреляций по теплообмену и трению со стенкой и давление во втором контуре.

Максимальные неопределенности результатов расчета температур теплоносителя составили 12 К, расходов теплоносителя – 0.5 кг/с. Погрешности расчета, оцененные по методике, представленной в работе [7], составили:  $\pm 6$  К для температуры теплоносителя первого контура и 35% для расхода теплоносителя.

### 3. МОДЕЛИРОВАНИЕ БОЛЬШОЙ ТЕЧИ ИЗ ГОРЯЧЕГО ТРУБОПРОВОДА ПРИ ИМИТАЦИИ ДВУХСТОРОННЕГО ИСТЕЧЕНИЯ НА СТЕНДЕ ПСБ-ВВЭР

Второй стенд, рассматриваемый в настоящей работе – крупномасштабный интегральный стенд ПСБ-ВВЭР, представляющий собой модель реакторной установки типа ВВЭР-1000 и предназначенный для исследования теплогидравлических процессов, протекающих в первом контуре АЭС с реакторной установкой типа ВВЭР-1000 в режимах нормальной эксплуатации и нарушений нормальной эксплуатации. Высотные отметки стенда соответствуют натурным, объемно-мощностные относятся к реальным как – 1 : 300. Второй контур АЭС на стенде моделируется частично. На рис. 6 представлена компоновка стенда, подробное описание можно найти в [10].

В отличие от ИСБ-ВВЭР стенд состоит из четырех идентичных петель циркуляции, замкнутых на модель реактора. В каждой петле содержатся циркуляционный насос, парогенератор, холодный и горячий трубопроводы. Также стенд оснащен компенсатором давления и системой аварийного охлаждения активной зоны. Модель реактора состоит из внешнего опускного участка, модели активной зоны, байпаса активной зоны, верхней камеры смешения. Парогенераторы в каждой из петель осуществляют отвод тепла от первого контура. Модель парогенератора представляет собой вертикальный сосуд, внутри которого находятся два вертикальных коллектора, соединенные горизонтальными теплообменными спиральными трубками, образующими теплообменную поверхность.

Система аварийного охлаждения активной зоны включает пассивную систему и две активных – САОЗ высокого давления и САОЗ низкого давления. Пассивная система состоит из четырех гидроемкостей, попарно подключенных к входной и выходной камерам реактора. Имитация активной части САОЗ (системы высокого и низкого давления) осуществляется подачей воды из коллектора высокого давления. Из этой системы охлаждающая вода может подаваться в первый контур. Вода активной САОЗ может подаваться в три петли, как в холодные, так и в горячие трубопроводы.

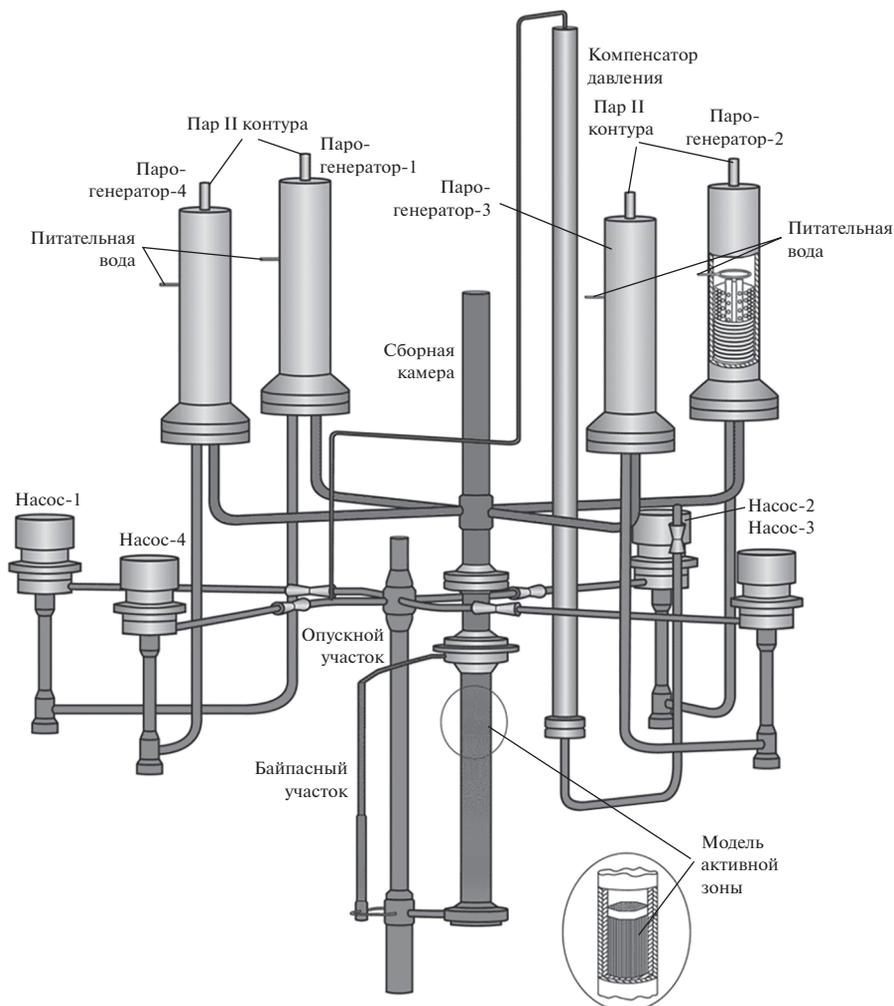


Рис. 6. Компоновка интегрального стенда ПСБ-ВВЭР.

Для исследования аварий с потерей теплоносителя в составе стенда смонтирована система для организации двухсторонней течи из горячего трубопровода третьей петли – узел имитации течи (УИТ). Для валидации был выбран эксперимент с большой течью теплоносителя из горячего трубопровода при имитации двухстороннего истечения: “Большая течь из “горячего” трубопровода ( $2 \times 25\%$ )” [10].

Перед началом эксперимента на стенде проводилась процедура установления стационарного состояния. В момент времени  $\tau = 0$  с открытием клапана в горизонтальном участке горячего трубопровода третьей петли начинался аварийный процесс. В результате происходило резкое уменьшение давления, и начиналось истечение теплоносителя. Одновременно с началом открытия клапана подавалась команда на закрытие отсечного клапана, установленного в “горячем” трубопроводе петли № 3 между патрубками каналов истечения. Таким образом имитировалось двухстороннее истечение теплоносителя при разрыве главного циркуляционного трубопровода. Оценочное время разрыва мембран – от 0.01 до 0.001 с.

При достижении в верхней камере смешения (ВКС) давления  $P = 13.73$  МПа формировался сигнал на срабатывание имитации действия АЗ-1, по которому мощность рабочего и байпасного участка начинала уменьшаться по определенному закону. Мощность, выделяемая в РУ, при достижении величины 180 кВт (1.8% от номинальной моделируемой мощности) фиксировалась и далее оставалась постоянной до конца эксперимента. Одновременно фиксировалась мощность на байпасном участке (БУ).

Одновременно со снижением мощности по сигналу АЗ-1 формировались сигналы на выполнение следующих операций:

- прекращался сброс пара из парогенераторов (ПГ);
- температура питательной воды, подаваемой в ПГ, изменялась с 493 до 423 К за 30 с;
- включилась программа имитации выбега всех насосов;
- отключился нагреватель КД.

При достижении уровня в КД значения 4.21 м происходило автоматическое отключение электрической нагрузки КД, если это не произведено раньше по уставке достижения давления в ВКС:  $P_{\text{ВКС}} = 14.7$  МПа. При снижении давления в ВКС ниже 10.79 МПа, но не раньше, чем через 22 с после начала аварийного процесса (время, необходимое для запуска дизеля-генератора и включения канала системы безопасности), начиналась подача охлаждающей воды САОЗ ВД (высокого давления) в холодный трубопровод петли № 1. Расход охлаждающей воды равный 0.12 кг/с автоматически поддерживался системой контроля и управления стендом (СКУ). Температура охлаждающей воды 301 К. Подача воды из САОЗ ВД продолжалась до тех пор, пока суммарный объем воды не достигал  $0.052 \text{ м}^3$ , далее подача воды из этой системы прекращалась (имитация окончания запаса воды в баке). При снижении давления в ВКС ниже 5.88 МПа открывались обратные клапаны ГЕ-1, и начиналась работа пассивной системы безопасности. При снижении давления в ВКС ниже 2.16 МПа начиналась подача охлаждающей воды САОЗ низкого давления в холодный и горячий трубопроводы петли № 3. В каждый трубопровод подавался расход равный 0.35 кг/с. Далее СКУ автоматически поддерживала это значение расхода. Работа САОЗ низкого давления продолжалась до конца эксперимента. При снижении давления в ВКС ниже 0.4 МПа истечение теплоносителя из контура прекращается (имитация достижения давления в защитной оболочке). Эксперимент прекращался по указанию экспериментатора путем отключения электрической нагрузки РУ и БУ и закрытия линий системы САОЗ низкого давления.

Нодализационная схема стенда ПСБ-ВВЭР, разработанная для расчетов, включает в себя модель реактора, четыре циркуляционные петли с парогенераторами и насосами, компенсатор давления, оснащенный электронагревателем, второй контур парогенераторов, гидроемкости САОЗ, систему паропроводов с клапанами БРУ-А, систему подачи воды от системы САОЗ высокого и низкого давления.

Модель активной зоны задана с помощью специального элемента расчетного кода “Активная зона”, разработанного для упрощения задания входных данных, со следующими характеристиками:

- 15 ячеек по высоте элемента;
- проходное сечение  $0.01344 \text{ м}^2$ ;
- гидравлический диаметр 9.926 мм;
- общая длина 3.530 м;
- количество имитаторов твэл – 168;
- на входе задан коэффициент местного сопротивления = 0.76;
- коэффициенты местного сопротивления = 0.54 установлены на 15 позициях в соответствии с высотными отметками дистанционирующих решеток.

Имитаторы твэл в радиальном направлении разделены на 3 области:

- 1-я область – с тепловыделением, материал – нихром (“Nichrom”), 2 расчетных ячейки по радиусу;

– 2-я область – без тепловыделения, материал – оксид магния (“MgO”), 1 расчетная ячейка по радиусу;

– 3-я область – без тепловыделения, материал – сталь (“StSt”), 2 расчетных ячейки по радиусу.

В аксиальном направлении имитаторы твэл разбиты на 18 расчетных ячеек, из них с тепловыделением – 15 с одинаковыми коэффициентами неравномерности 1.243626.

Геометрия элементов разработанной нодализационной схемы сравнивалась с геометрией реальных элементов стенда аналогично тому, как было продемонстрировано для эксперимента на стенде ИСБ-ВВЭР.

До начала расчета эксперимента проводилась процедура расчета стационарного состояния. Продолжительность стационарного расчета – 1000 с, за которые основные параметры расчета изменялись максимум на 0.7%. Начальные условия в момент времени перед открытием течи представлены в табл. 4. Расходы питательной воды и пара в таблице не сравниваются, поскольку на стенде автоматические регуляторы работают в импульсном режиме.

После открытия линии течи давление в первом контуре начало быстро уменьшаться. Через 0.06 с давление в ВКС достигло уставки 13.73 МПа, что привело к началу срабатывания системы имитации АЗ-1.

В результате резкого снижения давления в первом контуре теплоноситель, находящийся в КД, вскипел и вытеснился в горячий трубопровод первого контура. К 12.5-й с компенсатор давления был полностью обезвожен.

Из-за большой площади разрыва расход теплоносителя в первые несколько секунд в петлях увеличился примерно в 3 раза. Из-за прекращения сброса пара из ПГ и продолжавшейся некоторое время подачи питательной воды (поддержание номинального уровня) наблюдался рост весового уровня во всех ПГ. Из рис. 7 видно, что давление первого контура примерно на 10 с стало меньше давления второго контура, что привело к реверсу теплообмена в парогенераторах. Первый контур потерял возможность стока тепла в ПГ, и изменение давления в нем стало определяться только выносом массы теплоносителя и тепловыми потерями. Изменение давления второго контура связано в основном с тепловыми потерями от корпусов ПГ и с некоторым стоком тепла в первый контур.

При дальнейшем снижении давления первого контура на 22-й с в первом контуре были созданы условия для начала работы САОЗ высокого давления. Расход охлаждающей воды составлял 0.12 кг/с.

После достижения в первом контуре давления равного давлению в штатных гидроемкостях САОЗ, примерно на 30 с (рис. 8) из гидроемкостей стала поступать вода в модель реактора. Отсечение ГЕ произошло примерно на 135 с.

На 60 с давление в первом контуре достигло величины срабатывания уставки САОЗ низкого давления, которая вместе с САОЗ высокого давления и гидроемкостями сыграла важную роль в поддержании нормального температурного режима имитаторов твэл.

Уровень теплоносителя в модели реактора показан на рис. 9. После обезвоживания ВКС пар, находящийся под крышкой модели реактора, начал перегреваться от стенок корпуса и прочих металлоконструкций.

Наиболее важным параметром с точки зрения безопасности является температура оболочки имитаторов твэл. Она напрямую зависит от заполнения модели реактора теплоносителем первого контура. Как следует из сценария, в работе находились два канала системы безопасности. Результатом работы этих каналов и их влиянием на температурный режим теплоносителя на обогреваемом участке и оболочки имитаторов твэл стало то, что температура оболочки имитаторов твэл, в основном, находилась на уровне температуры насыщения при текущем давлении, за исключением первых секунд процесса, когда наблюдается расхождение между расчетными и экспериментальными значениями (рис. 10). В расчете примерно к 8-й с модель активной зоны

**Таблица 4.** Сравнение экспериментальных и расчетных параметров для стационарного состояния

Параметр	ПСБ-ВВЭР [10]	Расчет
Первый контур		
Мощность РУ, кВт	1520	1520
Мощность БУ, кВт	16.0	16.0
Давление в ВКС, МПа	15.78	15.78
Температура теплоносителя на входе в РУ, К	563.7	564.0
Температура теплоносителя на выходе из РУ, К	593.1	594.0
Температура теплоносителя в ВКС (на отметке 12525 мм), К	573.6	573.6
Температура теплоносителя в петле № 1, К		
в “горячей” нитке	592.0	594.1
в “холодной” нитке на выходе из ПГ	567.9	566.7
в “холодной” нитке после ГЦН	567.4	564.7
в “холодной” нитке рядом с ОУ (ХК теплопара)	564.2	564.4
Температура теплоносителя в петле № 2, К		
в “горячей” нитке	591.0	594.0
в “холодной” нитке на выходе из ПГ	565.5	566.9
в “холодной” нитке после ГЦН	564.0	564.9
в “холодной” нитке рядом с ОУ (Pt-терморезистор)	562.8	564.7
Температура теплоносителя в петле № 3, К		
в “горячей” нитке	590.5	594.0
в “холодной” нитке на выходе из ПГ	566.5	566.7
в “холодной” нитке после ГЦН	563.7	564.6
в “холодной” нитке рядом с ОУ (ХК теплопара)	562.5	564.5
Температура теплоносителя в петле № 4, К		
в “горячей” нитке	591.0	594.0
в “холодной” нитке на выходе из ПГ	565.9	566.6
в “холодной” нитке после ГЦН	562.9	565.1
в “холодной” нитке рядом с ОУ (Pt терморезистор)	561.1	564.8
Расход теплоносителя, кг/с:		
в петле № 1	2.28	2.25
в петле № 2	2.36	2.36
в петле № 3	2.31	2.31
в петле № 4	2.19	2.19
Уровень в КД, м	6.98	7.01
Гидроемкости (ГЕ) САОЗ		
Давление, МПа:		
в ГЕ № 1	5.92	5.92
в ГЕ № 2	5.87	5.87
в ГЕ № 3	5.87	5.87
в ГЕ № 4	5.89	5.89
Уровень воды, м:		
в ГЕ № 1	4.85	4.85
в ГЕ № 2	4.82	4.82
в ГЕ № 3	4.91	4.91
в ГЕ № 4	4.90	4.90
Второй контур		
Давление, МПа:		
в ПГ № 1	7.86	7.75
в ПГ № 2	7.75	7.76
в ПГ № 3	7.80	7.74
в ПГ № 4	7.72	7.74
Уровень, м:		
в ПГ № 1	1.66	1.66
в ПГ № 2	1.68	1.68
в ПГ № 3	1.68	1.68
в ПГ № 4	1.65	1.65
Температура питательной воды, К	464.0	464.0

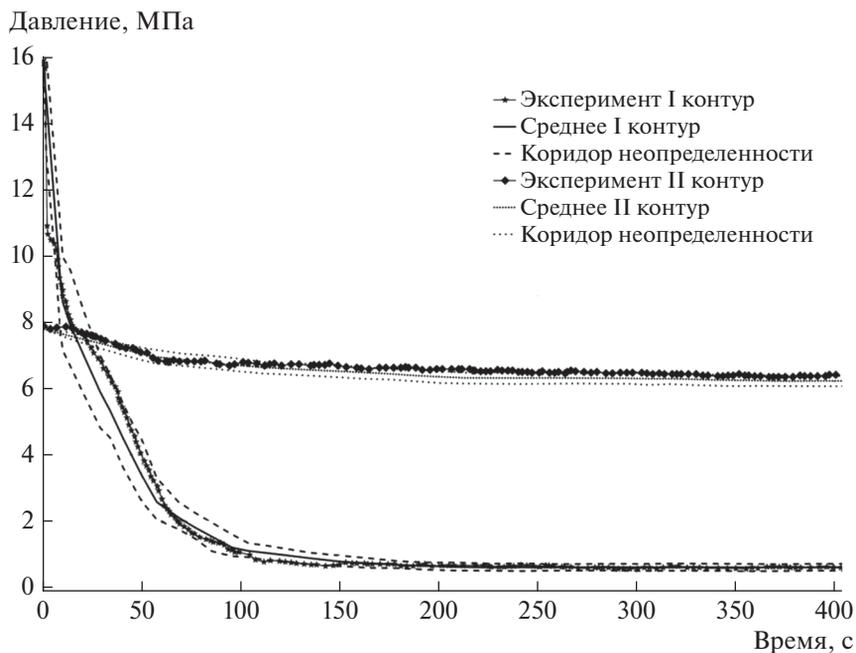


Рис. 7. Давление в первом и втором контурах.

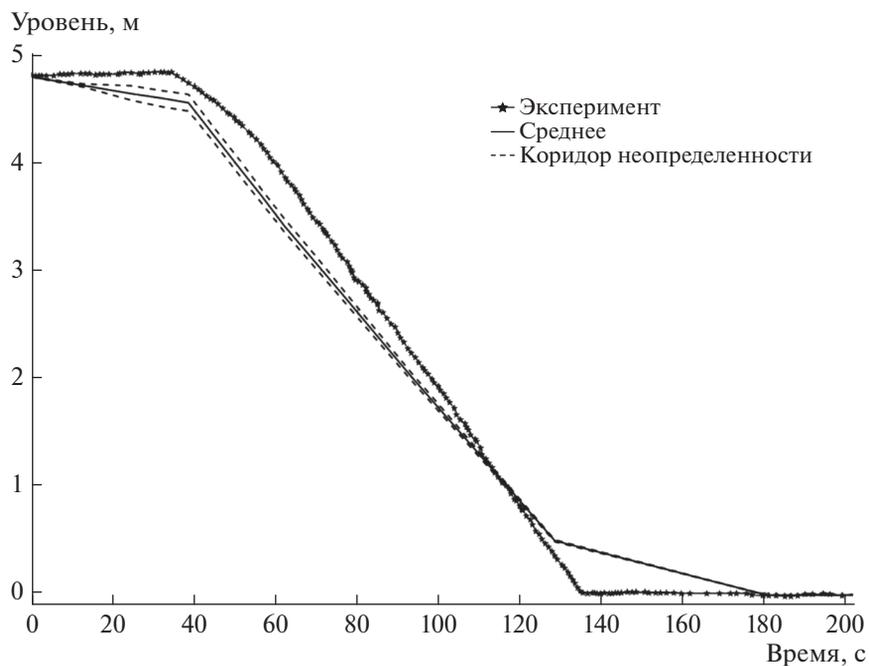


Рис. 8. Уровень в баках гидроемкостей САОЗ (ВКС).



Рис. 9. Уровень теплоносителя в модели активной зоны.

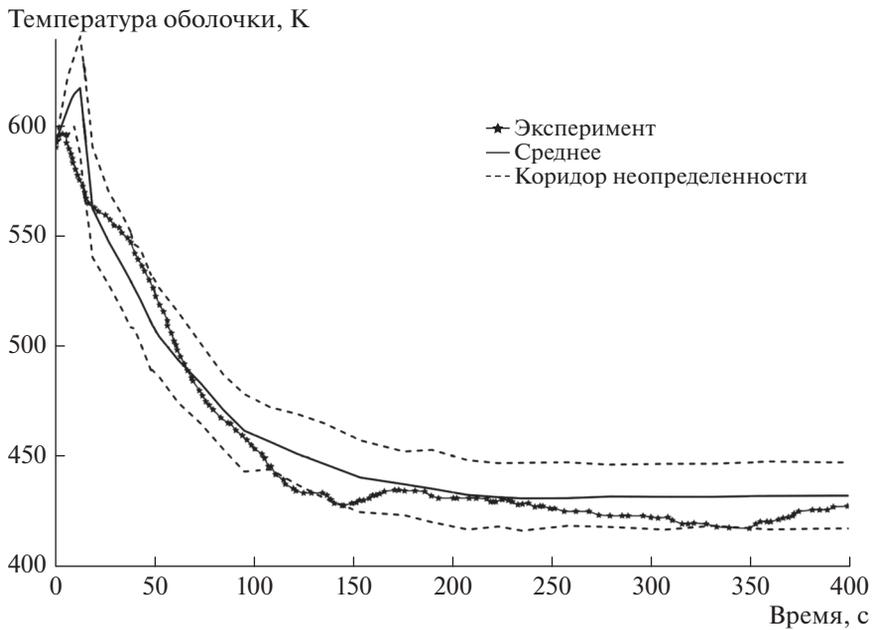


Рис. 10. Температура имитаторов твэл в середине обогреваемого участка.

практически обезвоживается, что сопровождается скачкообразным ростом температур имитаторов твэл до 630 К в центральной и верхней части, чего в эксперименте не наблюдалось.

На 400 с расчет процесса был остановлен по условию достижения давления в корпусе реактора значения 0,4 МПа.

Продемонстрированные результаты показывают возможности кода HYDRA-IBRAE/H<sub>2</sub>O адекватно воспроизводить процессы и явления, связанные с истечением теплоносителя в разрыв. Как и в случае моделирования малой течи на стенде ИСБ-ВВЭР, анализ чувствительности с использованием коэффициентов корреляции рангов Спирмена показал наибольшее влияние на результаты расчета неопределенностей корреляций, заложенных в код.

Максимальные диапазоны неопределенностей расчета составили: температур оболочки имитаторов твэл – 40 К, давления в первом контуре – 4 МПа, уровня в модели активной зоны – 2 м. Погрешность расчета температуры оболочки твэл составила  $\pm 8$  К, погрешность расчета давления в первом контуре – 8,5%.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе приведены результаты расчетов по коду HYDRA-IBRAE/H<sub>2</sub>O экспериментов по изучению малой течи 2,4% из верхней камеры смешения на стенде ИСБ-ВВЭР и большой течи из горячего трубопровода при имитации двухстороннего истечения на стенде ПСБ-ВВЭР. Полученные результаты подтвердили адекватное воспроизведение кодом различных взаимосвязанных процессов при авариях с большой и малой течью теплоносителя из первого контура. Показано хорошее совпадение основных параметров (давлений, температур теплоносителя и оболочек имитаторов твэл, хронологии срабатывания различных систем безопасности) в расчете и эксперименте на всех стадиях протекания исследуемых режимов. Оценены погрешности моделирования ключевых параметров, важных для обоснования безопасности объектов использования атомной энергии, а также определены коэффициенты чувствительности, которые дают важную информацию для проведения многовариантных расчетов режимов с малой и большой течью теплоносителя реакторных установок технологии ВВЭР.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дружаев А.А., Мосунова Н.А. Состояние разработки программно-технического комплекса “Виртуально-цифровая АЭС с ВВЭР” // Сборник тезисов докладов межотраслевого научно-технического семинара “Моделирование динамики ЯЭУ” (разработка программных средств, верификация, оценка точности расчета). г. Сосновый Бор, 5–7 июня 2018 г. С.14–16.
2. Девкин А.С., Мелихов О.И., Москалев А.М., Соловьев С.Л., Сулов А.И., Уголева И.Р., Фукс Р.Л. Зарубежные теплогидравлические коды улучшенной оценки. Опыт разработки, создания и применения. Москва, 2000.
3. Калинин С.Д., Крошилин А.Е., Крошилин В.Е., Смирнов А.В. Опыт верификации теплогидравлического программного комплекса БАГИРА на интегральном стенде ИСБ-ВВЭР // Теплоэнергетика. 2003. № 11. С. 10–15.
4. Мигров Ю.А., Чернов И.В., Юдов Ю.А. Результаты верификации расчетных кодов ДЖИП и RELAP5 на стенде ИСБ-ВВЭР на основе стандартных проблем безопасности СПБ-1 и СПБ-2 // Теплоэнергетика. 1999. № 3. С. 8–13.
5. Шепетильников Э.Ю., Мелихов О.И., Мелихов В.И. Эксперимент “малая течь” на интегральном стенде ИСБ-ВВЭР с помощью кода ATHLET // Теплоэнергетика. 1999. № 6. С. 63–66.
6. Petrucci A., D’Auria F. Thermal-Hydraulic System Codes in Nuclear Reactor Safety and Qualification Procedures // Science and Technology of Nuclear Installations. 2008. V. 2008. Article ID 460795. P. 1–16.
7. Моисеенко Е.В., Мосунова Н.А. Методика оценки неопределенностей результатов расчета для задач обоснования безопасности объектов использования атомной энергии // Вопросы Радиационной Безопасности. 2018. № 2(90). С. 24–34.

8. *Moiseenko E.V., Filippov A.S.* A methodology for multivariate simulation with massively parallel computing systems for NPP safety assessment: VARIA code // Journal of Engineering Thermophysics. 2011. № 20. № 3. P. 249–259.
9. *Гашенко М.П.* Исследование нестационарных теплогидравлических процессов в аварийных режимах с потерей теплоносителя применительно к первому контуру ЯЭУ с водо-водяным реактором: дис. к. т. н. Электрогорск, 1999. 149 с.
10. *Елкин И.В.* Моделирование на крупномасштабных установках аварийных режимов РУ ВВЭР-100 с целью обоснования и обеспечения из безопасной эксплуатации: дис. д. т. н. Москва, 2005. 205 с.

### **Validation of HYDRA-IBRAE/H2O Code on Experiments Conducted on Integral Test Facilities ISB-VVER and PSB-VVER**

**I. N. Drobyshevskaya<sup>a, \*</sup>, N. A. Mosunova<sup>a</sup>, S. S. Pylev<sup>a</sup>, and S. V. Tsaun<sup>a</sup>**

<sup>a</sup>*Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

*\*e-mail: drob@ibrae.ac.ru*

The results of the HYDRA-IBRAE/H2O code validation on experiments performed on integral test facilities ISB-VVER and PSB-VVER are presented in the paper. System thermal-hydraulic code HYDRA-IBRAE/H2O is a modern tool for numerical simulation of thermalhydraulic processes in water-cooled reactors of VVER type. Small break loss of coolant accident (LOCA) with 2.4% leak from upper plenum on ISB-VVER facility and large break LOCA on hot leg on PSB-VVER facility with imitation of two-sided leak are presented. Principal aspects of numerical simulation and error estimation are outlined. Brief description of the facilities and chosen scenarios, as well as characteristics of nodalization schemes are given. Simulation results and errors calculated with the methodology developed in IBRAE RAN that allows account for uncertainties of input data, mathematical models and numerical simulation uncertainties are presented.

*Keywords:* HYDRA-IBRAE/H2O, validation, integral facility, small break, large break, VVER, loss of coolant accident, system thermalhydraulic code, uncertainties analysis