УДК 532.542: 004.942

Расчёты по коду КОРСАР/CFD процессов перемешивания пробки конденсата при пуске циркуляционного насоса в модели реактора ВВЭР-1000 на стенде ОКБ «ГИДРОПРЕСС»

Ю.В. Юдов, С.Н. Румянцев, С.С. Чепилко, Д.С. Кастерин

ФГУП «НИТИ им. А.П. Александрова», г. Сосновый Бор Ленинградской области, Россия

Аннотация

Представлено сопоставление результатов расчётов по коду КОРСАР/CFD с данными первой серии экспериментов, проведенных на модели реактора ВВЭР-1000 четырёхпетлевого стенда ОКБ «ГИДРОПРЕСС». Эксперименты моделируют процессы перемешивания в случае проникновения в активную зону через напорную камеру реактора пробки конденсата с пониженной концентрацией борной кислоты из гидрозатвора холодной нитки при пуске одного циркуляционного насоса. Показано влияние картины течения теплоносителя в кольцевой области камеры на распределение концентрации борной кислоты на входе в активную зону.

Ключевые слова: реакторная установка, напорная камера, теплоноситель, концентрация, эксперимент, расчётный код, расчётная сетка, вычислительная гидродинамика.

UDC УДК 532.542: 004.942

KORSAR/CFD calculations of condensate plug mixing processes after start of circulation pump in VVER-1000 model at OKB “GIDROPRESS” test facility

Yu.V. Yudov, S.N. Rumyantsev, S.S. Chepilko, D.S. Kasterin

FSUE “Alexandrov NITI”, Sosnovy Bor, Leningrad region, Russia

Abstract

The paper compares KORSAR/CFD calculation results and data obtained from the first series of experiments carried out in the VVER-1000 reactor model at the OKB “GIDROPRESS” four-loop test facility. The experiments simulated mixing processes that occurred when one circulation pump was started and a condensate plug with low boron concentration flowed from the cold leg loop seal to the reactor core and entered it through the lower plenum. The effect of the coolant flow pattern in the plenum annular space on the boron concentration distribution at the core inlet is shown.

Key words: reactor, lower plenum, coolant, concentration, experiment, computer code, computational grid, computational fluid dynamics.

Введение

При расчётном обосновании безопасности реакторных установок (РУ) с ВВЭР выделяются режимы с различной динамикой температуры теплоносителя или концентрации борной кислоты по отдельным петлям циркуляционного контура. Особое внимание уделяется опасным сценариям со снижением данных параметров, приводящим к увеличению мощности реактора за счет отрицательных обратных связей. В качестве примеров можно привести режимы с раз-

рывом паропровода одного из парогенераторов, с подключением главного циркуляционного насоса (ГЦН) ранее неработавшей петли, с транспортировкой пробки деборированной воды (конденсата) из гидрозатвора холодной нитки при пуске ГЦН, с несанкционированным поступлением деборированной воды из системы подпитки и т.д. Перечисленные ситуации приводят к асимметричному возмущению поля температуры или концентрации борной кислоты на входе в активную зону и соответствующему асимметричному возмущению энерговыделения в тепловыделяющих сборках активной зоны. Динамика и распределение возмущений определяются в значительной мере процессами перемешивания в напорной камере реактора.

Для учёта трёхмерных эффектов в напорной камере реакторов специалистами «НИТИ им. А.П. Александрова» разработан CFD-модуль. Этот модуль основан на методе вложенной границы в идеологии обрезанных декартовых ячеек и адаптирован как типовой элемент в составе новой версии расчётного кода КОРСАР/CFD [1, 2]. При этом впервые связи с элементами одномерной модели реализованы по полунеявной схеме с использованием мономатричного подхода для вычисления давления в расчётных ячейках 1D и 3D областей.

Процессы перемешивания теплоносителя с различной температурой или концентрацией борной кислоты при несимметричном возмущении по петлям циркуляции реактора ВВЭР-1000 моделировались на четырёхпетлевом стенде в ОКБ «ГИДРОПРЕСС». Эксперименты проведены в рамках проекта TACIS R2.02/02 [3]. В качестве переносимого теплоносителем скаляра при исследовании процессов перемешивания использовался раствор соли NaCl.

В статье представлены результаты верификации расчётного кода КОРСАР/CFD на основе данных серии экспериментов, моделирующих ситуации с поступлением в активную зону РУ ВВЭР-1000 пробки конденсата из гидрозатвора холодной нитки в случае возобновления циркуляции по одной петле. Подробное описание стенда и выбранных для верификации экспериментальных режимов представлены в отчетах [4, 5].

Работа выполнена по заказу Главного конструктора РУ с ВВЭР ОКБ «ГИДРОПРЕСС».

Описание стенда и экспериментальных режимов

Основой экспериментальной установки является металлическая модель реактора ВВЭР-1000 в масштабе 1:5 (рис. 1). Модель реактора воспроизводит практически все геометрические особенности реактора 5-го блока Нововоронежской АЭС, которые влияют на процессы перемешивания теплоносителя от входных патрубков до входа в активную зону: напорную камеру между корпусом и шахтой, отверстия в эллиптическом днище шахты и блок опорных труб для 151-й кассеты. Для прохода жидкости в эллиптическом днище шахты имеется 1004 отверстия диаметром 8 мм и 320 отверстий диаметром 18 мм.

Вместо тепловыделяющей сборки и блока защитных труб реактора установлен имитирующий пучок из 91 трубки диаметром 14 мм, собранный с помощью трёх дистанционирующих решеток для моделирования гидравлического сопротивления. В трубках установлены штанги с кондуктометрическими датчиками для измерения концентрации раствора соли на выходе из опорных труб после нижней плиты.

Блок опорных труб между днищем шахты и нижней опорной плитой представлен на рис. 2. Вход теплоносителя в опорную трубу осуществляется через 12 щелевых отверстий размером 30×3 мм.

Модель реактора присоединена к четырем циркуляционным петлям. На рис. 3 схематично изображены две циркуляционные петли. Каждая петля оборудована циркуляционным насосом с частотно-регулируемым приводом электродвигателя, что обеспечивает заданный закон вы-

хода расхода на режимные параметры, и электромагнитным расходомером. Для сохранения объёмного соотношения теплоносителя на стенде и в реакторной установке используются расширительные баки. К одной из петель подключен компенсатор объёма. Эксперименты проводились при атмосферном давлении и температуре окружающей среды.

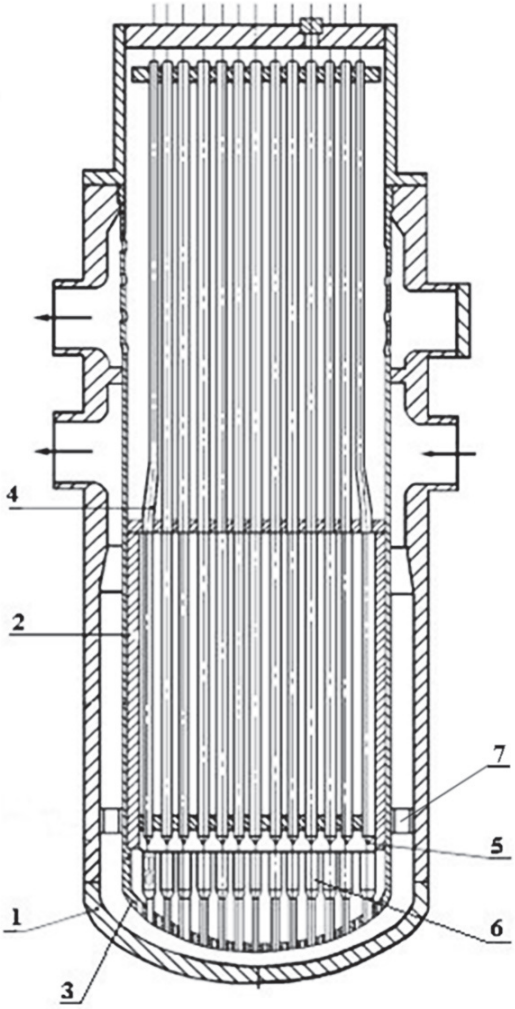

Рис. 1. Модель реактора:

1 – корпус, 2 – шахта, 3 – эллиптическое днище шахты, 4 – имитирующий пучок,
5 – зонды с кондуктометрическими датчиками концентрации, 6 – блок опорных труб, 7 – опоры шахты.

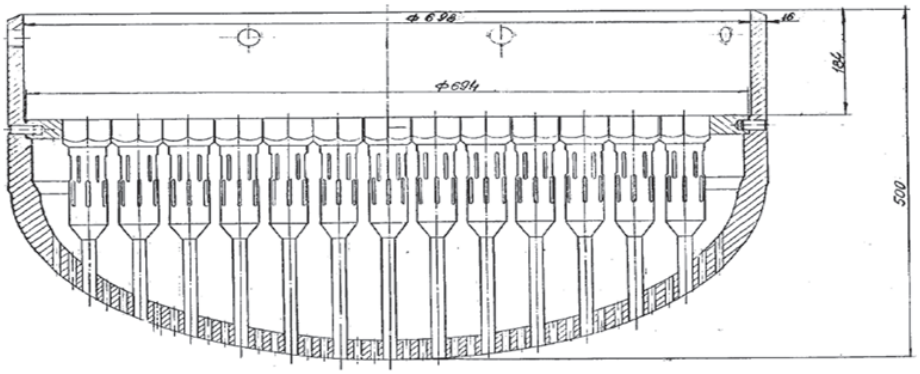

Рис. 2. Блок опорных труб

Для инжекции раствора соли в различные участки контура используются вспомогательные системы, состоящие из бака с солевым раствором, насоса подачи солевого раствора из бака, быстродействующих клапанов (задвижек) и системы трубопроводов подвода к основным петлям.

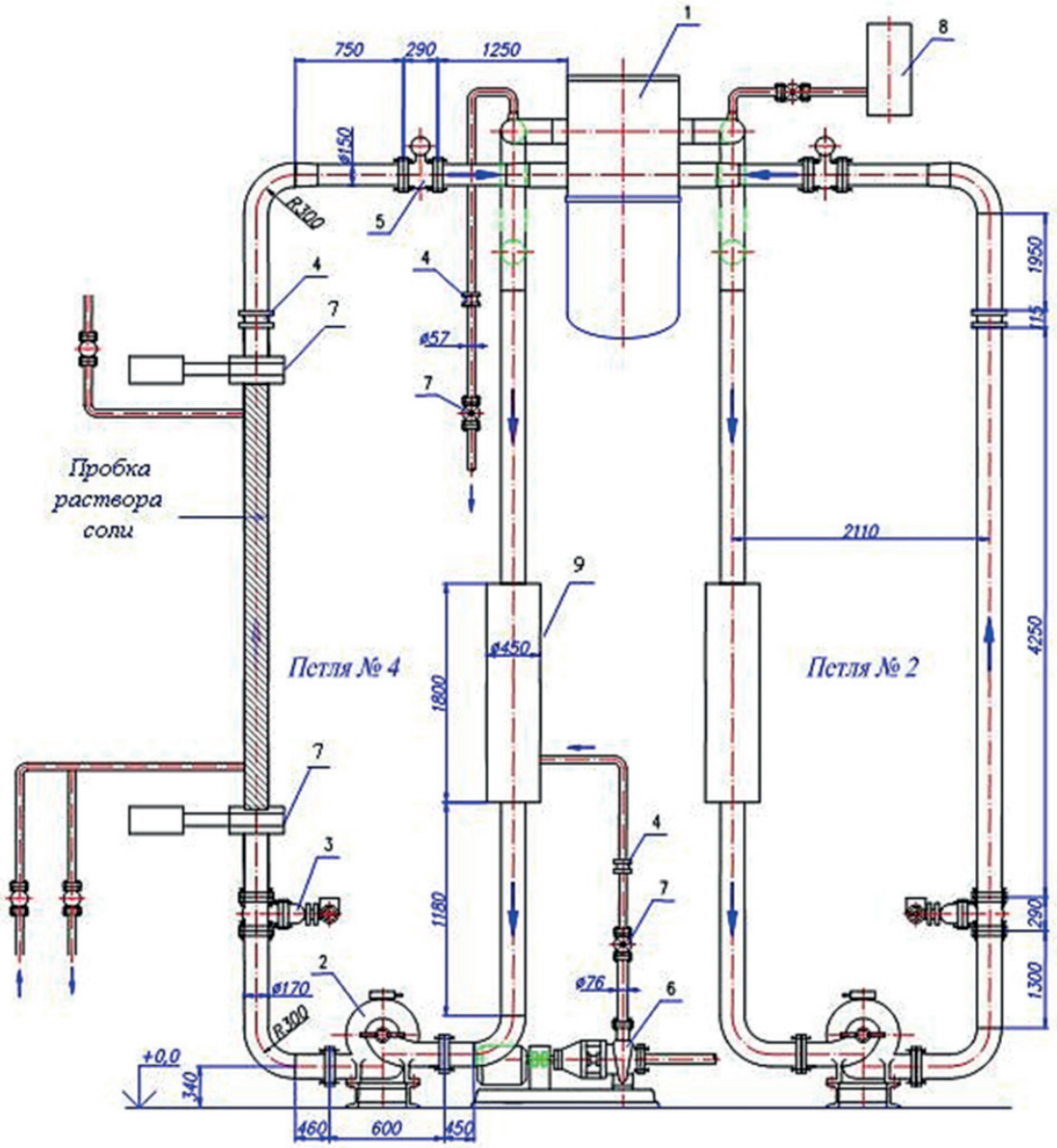

Рис. 3. Фронтальный вид экспериментальной установки:

1 – модель реактора, 2 – циркуляционный насос, 3 – задвижка с электроприводом, 4 – расходомерная шайба, 5 – электромагнитный расходомер, 6 – насос подачи солевого раствора, 7 – быстродействующий клапан (задвижка), 8 – компенсатор объёма, 9 – расширительный бак.

В ходе экспериментов с частотой 10 Гц регистрировались данные по:

– концентрации соли на выходе из 91 опорных труб (60 % от общего количества);

– концентрации соли во входных и выходных патрубках петель;

– расходы теплоносителя в петлях.

Расположение кондуктометрических датчиков на выходе из опорных труб приведено на рис. 4.

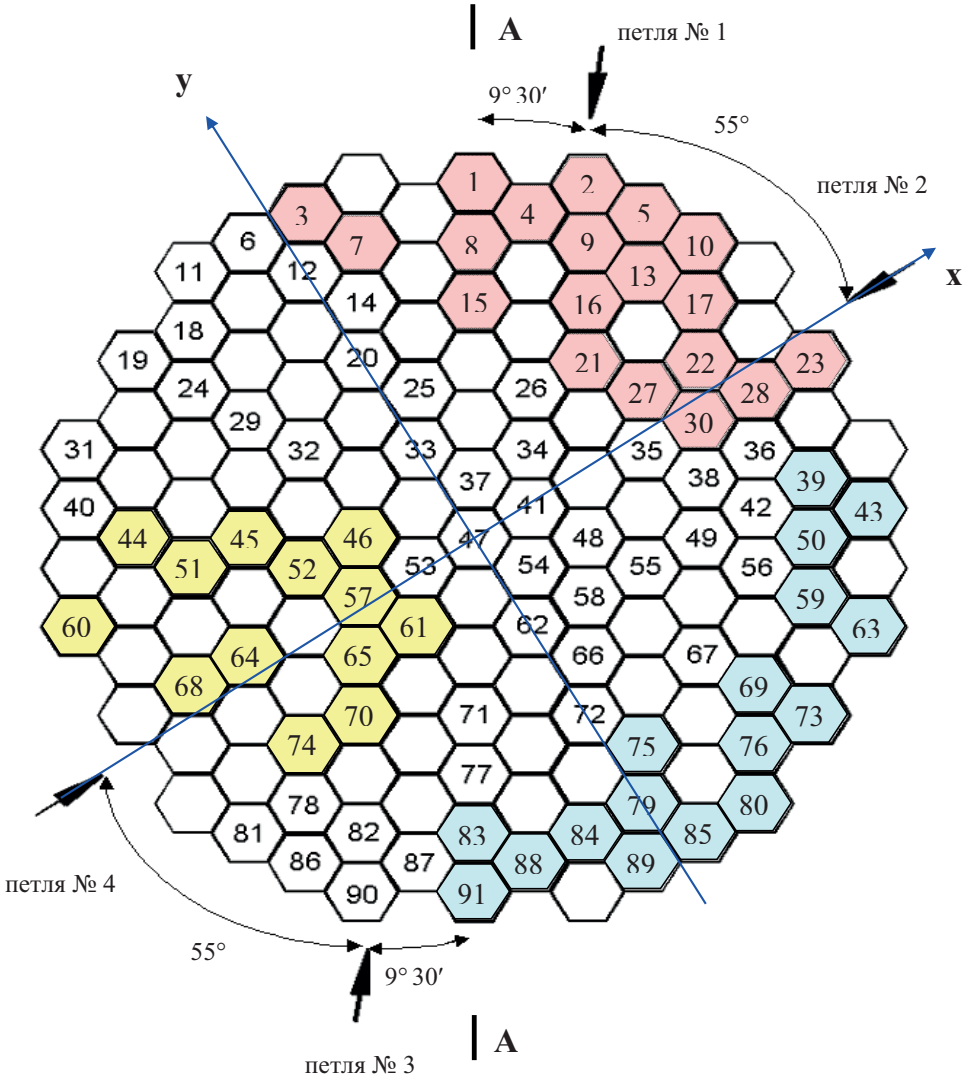

Рис. 4. Расположение кондуктометрических датчиков на выходе из опорных труб относительно петель (вид сверху)

Обработка и анализ экспериментальных данных по концентрации соли осуществлялись с использованием безразмерной относительной концентрации:

$$\Theta = (C - C_0)/(C_1 - C_0),$$

где C – концентрация в точке измерения, C_0 – начальная концентрация в циркуляционном контуре, C_1 – концентрация в баке раствора соли.

На стенде было реализовано две серии экспериментальных режимов.

Первая серия включала 5 режимов с проникновением в напорную камеру пробки солевого раствора при пуске одного ГЦН (2 режима) и при восстановлении ЕЦ (3 режима). Эти эксперименты моделировали ситуации с поступлением в активную зону РУ ВВЭР-1000 пробки чистого конденсата из гидрозатвора холодной нитки в случае возобновления циркуляции по одной петле. Восстановление ЕЦ осуществлялось пуском насоса с низкой производительностью. При реализации экспериментов этой серии в четвертую петлю вставлялись участки, изолированные дополнительными быстродействующими задвижками, в которых подготавливалась

пробка с раствором соли (заштрихованная область на рис. 3). Для верификации кода КОРСАР/CFD выбраны только два режима серии с пуском ГЦН, которые отличались объёмом пробки (0.072м^3 и 0.12м^3). С точки зрения обоснования безопасности реакторной установки интерес представляет начальная стадия неравномерного проникновения конденсата в активную зону после пуска насоса. На основе опытных данных для анализа результатов верификации выделены четыре зоны расположения датчиков концентрации. Три зоны, в которые начинается проникновение соли, отмечены различными цветами на рис. 4: желтым – зона 1, розовым – зона 2, голубым – зона 3. Остальные датчики отнесены к зоне 4.

Вторая серия режимов имитирует возмущения по концентрации соли в одной из петель при работе разного количества ГЦН. Результаты расчётов этой серии экспериментов по коду КОРСАР/CFD планируется изложить в следующей статье.

Каждый экспериментальный режим повторялся пять раз, то есть выполнялись пять практически идентичных опытов. Разброс в результатах измерений позволяет определить погрешность реализации сценариев экспериментов.

Расчётная модель

Четыре входных патрубка и напорная камера реактора между корпусом и шахтой моделировались в трёхмерной постановке с помощью CFD-модуля (см. рис. 5).

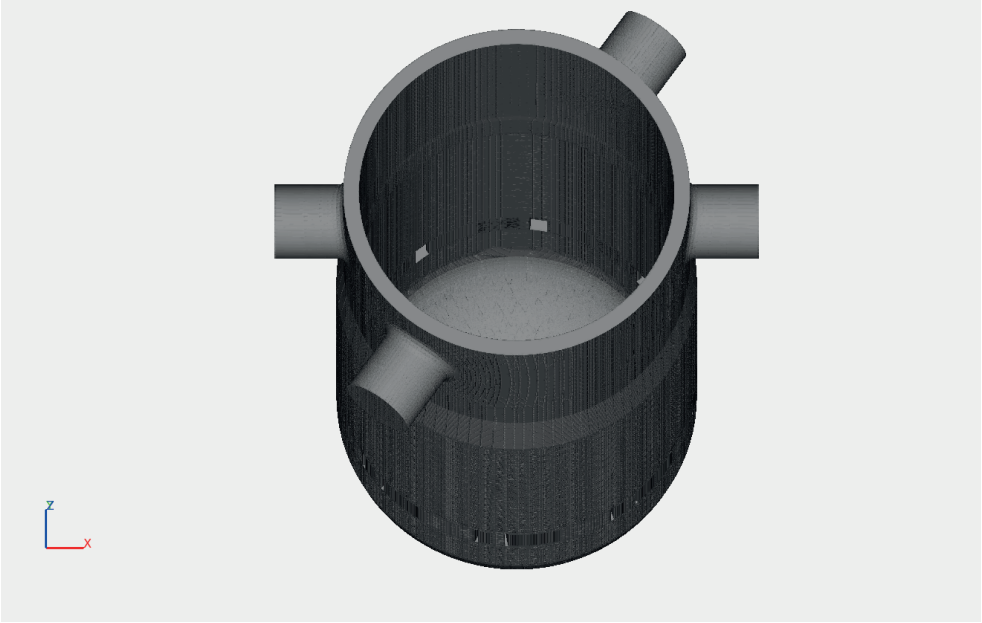

Рис. 5 – Трёхмерная область моделирования

В модели учитываются опоры шахты. При моделировании экспериментов ось x декартовой системы координат направлена из патрубка петли 4 в патрубок петли 2. Ось z имеет направление вверх вдоль оси модели реактора. Расчётная сетка содержит 6.7 миллиона одинаковых ячеек. Декартовы ячейки имеют практически форму куба с длиной рёбер около 3 мм. Фрагменты расчётной сетки вблизи днища шахты приведены на рис. 6. Из рисунка видно, что узкая часть области моделирования между корпусом и эллиптическим днищем шахты вдоль оси реактора включает в себя пять расчётных ячеек.

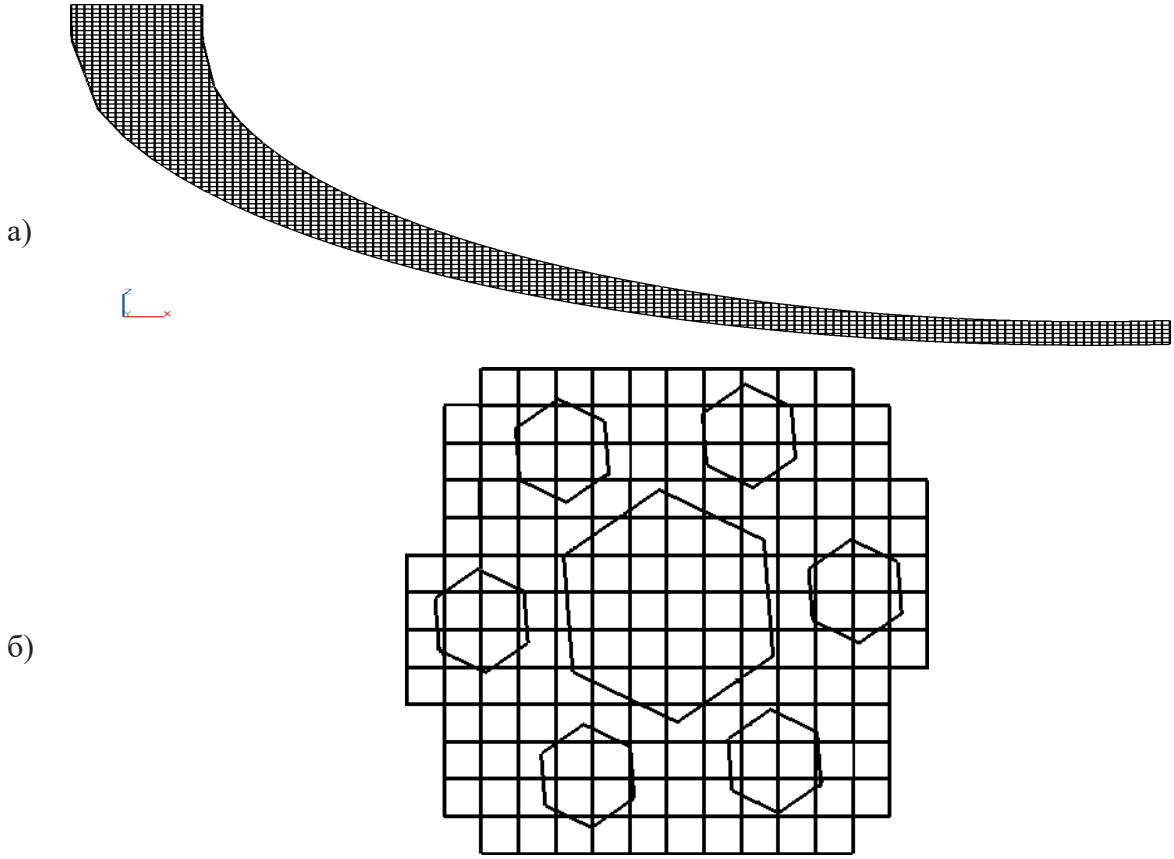

Рис. 6. Фрагменты расчётной сетки вблизи эллиптического днища шахты:

а) сечение xz, б) связка 3D и 1D областей.

Отверстия в эллиптическом днище количеством более 1300 и область за шахтой до выхода из опорных труб представлялась элементами 1D модели РК КОРСАР/CFD «канал», «коллектор» и «поперечное соединение». Пространство за шахтой разбивалось на 151 шестигранный канал, соответствующий опорным трубам и на 16 каналов, имитирующих периферийную часть нижней камеры без опорных труб. Периферийные каналы представлены четырьмя расчётными ячейками, шестигранные каналы разбиты на четыре, шесть и восемь расчётных ячеек. Количество расчётных ячеек увеличивается по мере приближения к центральной зоне. Ячейки каналов соединены между собой поперечными связями. Каналы, моделирующие отверстия в днище шахты, по входу связаны с элементом «CFD-модуль», а на выходе объединены посредством 167 элементов «коллектор» для присоединения к соответствующим периферийным и шестигранным каналам. На выходе из опорных труб с помощью элемента «граничная ячейка» задавалось общее давление. Одномерная расчётная схема модели нижней камеры показана на рис. 7 и рис. 8.

Использование одномерных элементов при нодализации нижней камеры реактора, затесненной металлическими конструкциями, эквивалентно применению модели пористого тела в этой области [6, 7].

Сечения 1324 отверстий нижней огибающей эллиптического днища шахты являются общими границами между 3D и 1D областями, через которые осуществляется связка 3D и 1D моделей. Следует отметить, что размер декартовых ячеек в 2.5 раза меньше диаметра малых отверстий и в 5.6 раза меньше диаметра больших отверстий. Поэтому сечение каждого отверстия диаметром 8 мм пересекает около четырех ячеек трёхмерной области, а отверстия диаметром 18 мм – порядка 20 ячеек (см. рис. 6).

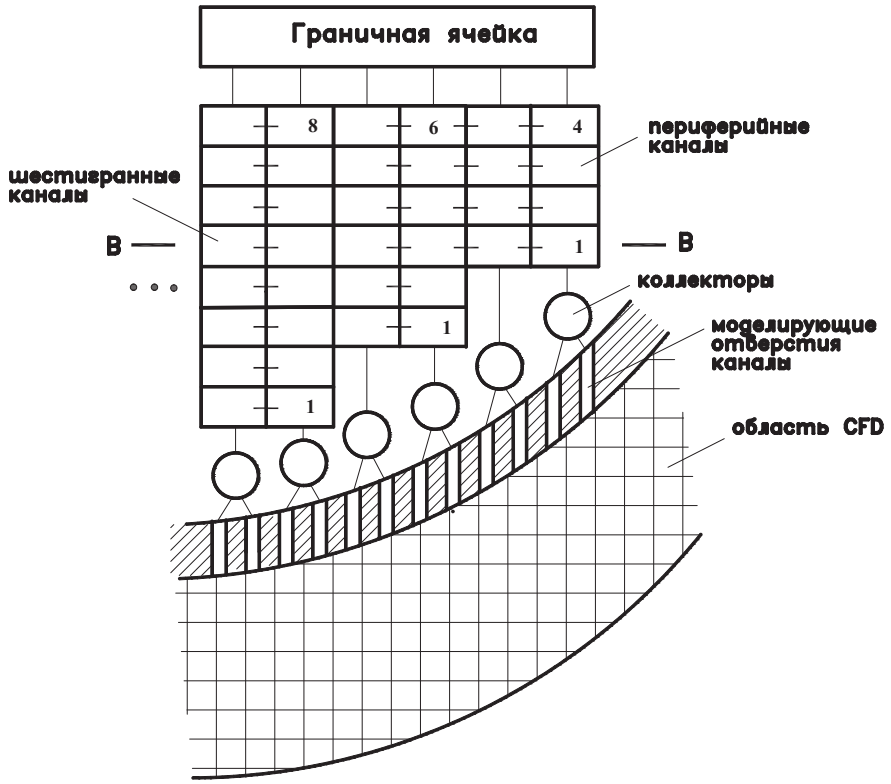

Рис. 7. Одномерная расчётная схема модели нижней камеры
(сечение А-А на рис. 4)

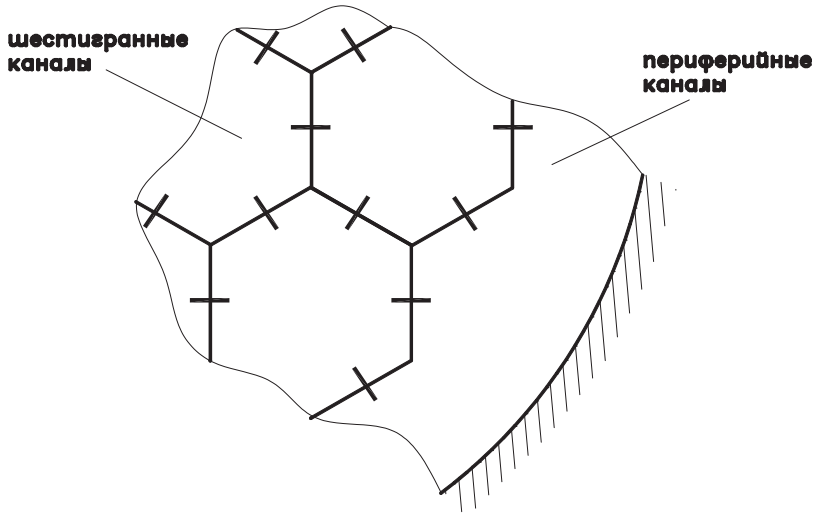

Рис. 8. Поперечные связи ячеек каналов нижней камеры
(сечение В-В на рис. 7)

Стыковки патрубков с фрагментами холодных ниток петель формируют четыре дополнительные границы между 3D и 1D областями моделирования. Фрагменты петель в 1D модели представлены короткими каналами длиной 0.035 м с одной расчётной ячейкой. Только холодная нитка работающей петли имитировалась длинным каналом протяженностью 8.5 м, разбитым равномерно на 240 расчётных ячеек. В начальный момент времени в этом канале задавалась пробка солевого раствора.

Динамика расходов по петлям для первой серии экспериментов задавалась по опытным данным с помощью элементов расчётной схемы «источник массы», подключенных ко входу в каналы фрагментов холодных ниток. Перенос безразмерной относительной концентрации солевого раствора в расчётах моделировался переносом безразмерной температуры теплоносителя:

$$\Theta = (T - T_0)/(T_1 - T_0),$$

где , $T_0 = 293.15\,\mathrm{K}$, $T_1 = 303.15\,\mathrm{K}$.

Расчёты выполнялись в режиме параллельных вычислений с использованием 273 процессов (один процесс для 1D области моделирования, 272 процесса для 3D области). Шаг интегрирования по времени составлял $2 \cdot 10^{-3}$ с. В 3D модели применялась алгебраическая модель турбулентности.

Сопоставление результатов расчётов и экспериментов

В качестве граничных условий при моделировании первой серии экспериментов задавались опытные данные по расходам теплоносителя, поступающего в напорную камеру из работающей петли 4 и уходящего из камеры в неработающие петли. На рис. 9 показаны изменения во времени расходов через работающую петлю.

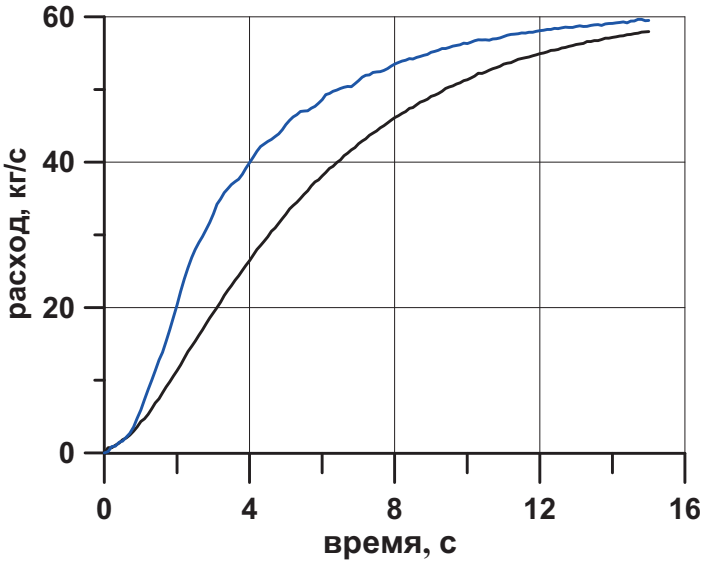

Рис. 9. Расход теплоносителя через работающую петлю

– режим 1, – режим 2

Согласно экспериментальным данным, перемешанная пробка солевого раствора начинает поступать в имитирующий активную зону пучок приблизительно на 9 с в режиме 1 и на 7 с в режиме 2. За 2 с наблюдается увеличение концентрации соли в трёх зонах: под патрубком работающей петли 4 и в двух, симметрично расположенных на противоположной стороне под патрубками неработающих петель (между петлями 1, 2 и между петлями 2, 3). Рост концентрации в остальной области происходит с запаздыванием порядка 1 с.

Динамика изменения концентрации соли на входе в активную зону обусловлена сложными трёхмерными гидравлическими процессами в напорной камере модели реактора. Качественно картина течения, полученная в расчётах по коду КОРСАР/CFD, выглядит следующим образом. Поступающий поток теплоносителя распространяется по обеим полуокружностям кольцевой камеры к противоположной стороне, постепенно приобретая вертикальную составляющую скорости, направленную к нижней камере. При этом под патрубком работающей петли образуется область стагнации потока. Соответственно, образуются два ярко выраженных языка распространения концентрации соли, которые являются причиной возникновения зон повышенной концентрации соли под неработающими петлями. Перед проникновением в нижнюю камеру через отверстия в эллиптическом днище шахты, эти два языка сливаются, дополнительно образуя третью зону повышенной концентрации соли под работающей петлей.

Для примера, на рис. 10 изображены поля скорости и относительной концентрации соли в момент времени 8 с по результатам расчёта режима 1. Следует отметить, что данная картина течения подтверждается расчётами этого эксперимента по коммерческому коду ANSYS CFX [8, 9]. Объяснение причины превалирующего растекания жидкости по окружности напорной камеры приведено в работе [10].

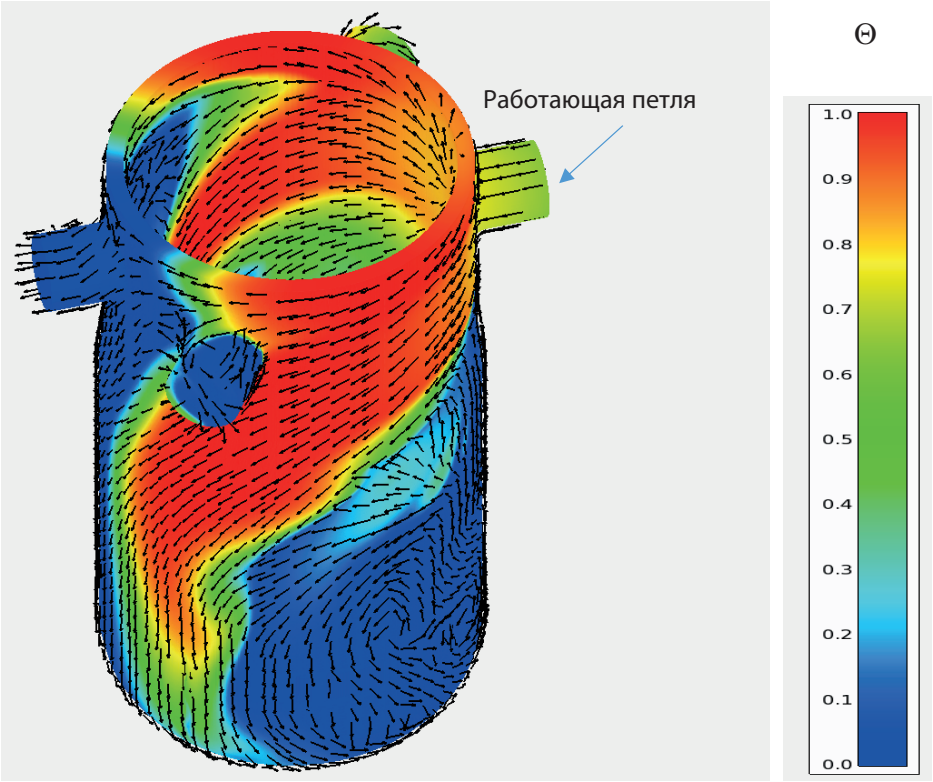

Рис. 10. Расчётные поля скорости и относительной концентрации соли при пуске одного насоса на модели ВВЭР-1000

Сопоставление расчётных и экспериментальных данных по динамике изменения концентрации соли в опорных трубах для выделенных зон и отдельных датчиков в них представлены на рис. 11, рис. 12 (режим 1) и на рис. 13, рис. 14 (режим 2).

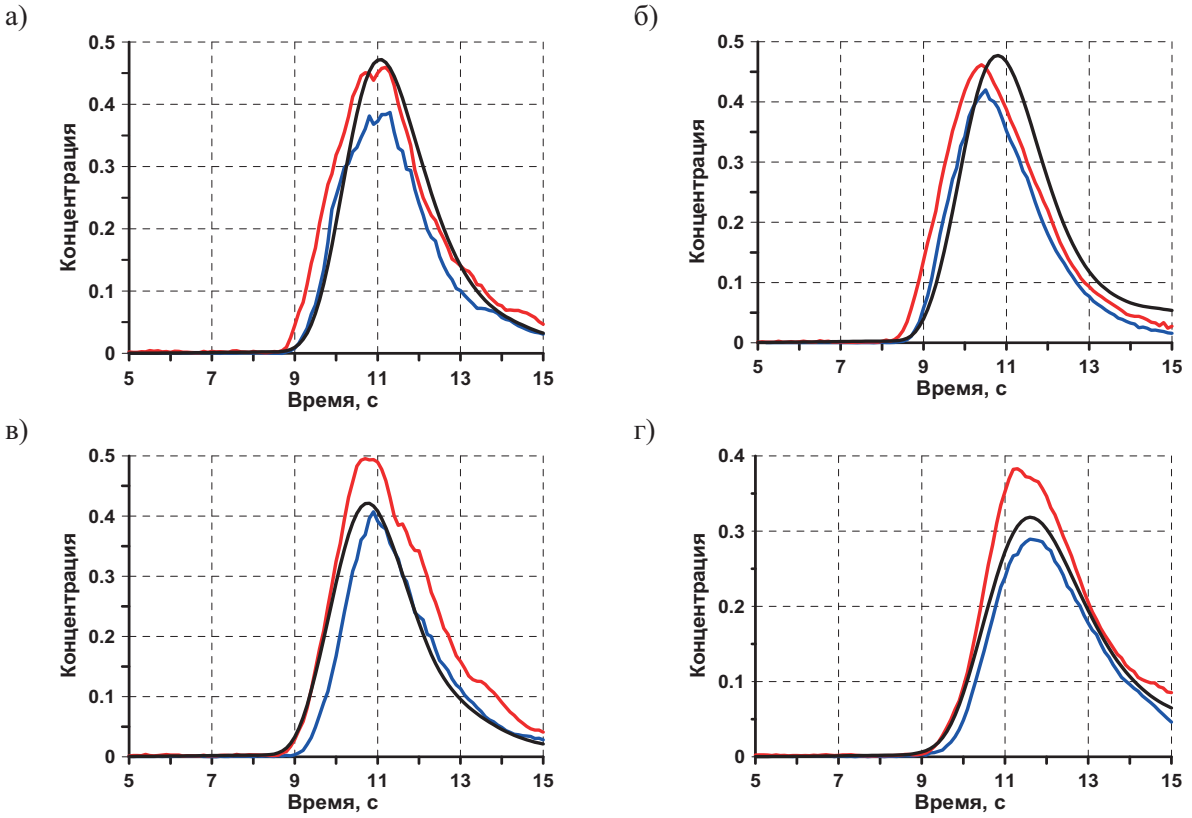

Рис. 11. Относительная концентрация соли на входе в опорные трубы для режима 1:
а) зона 1, б) зона 2, в) зона 3, г) зона 4.

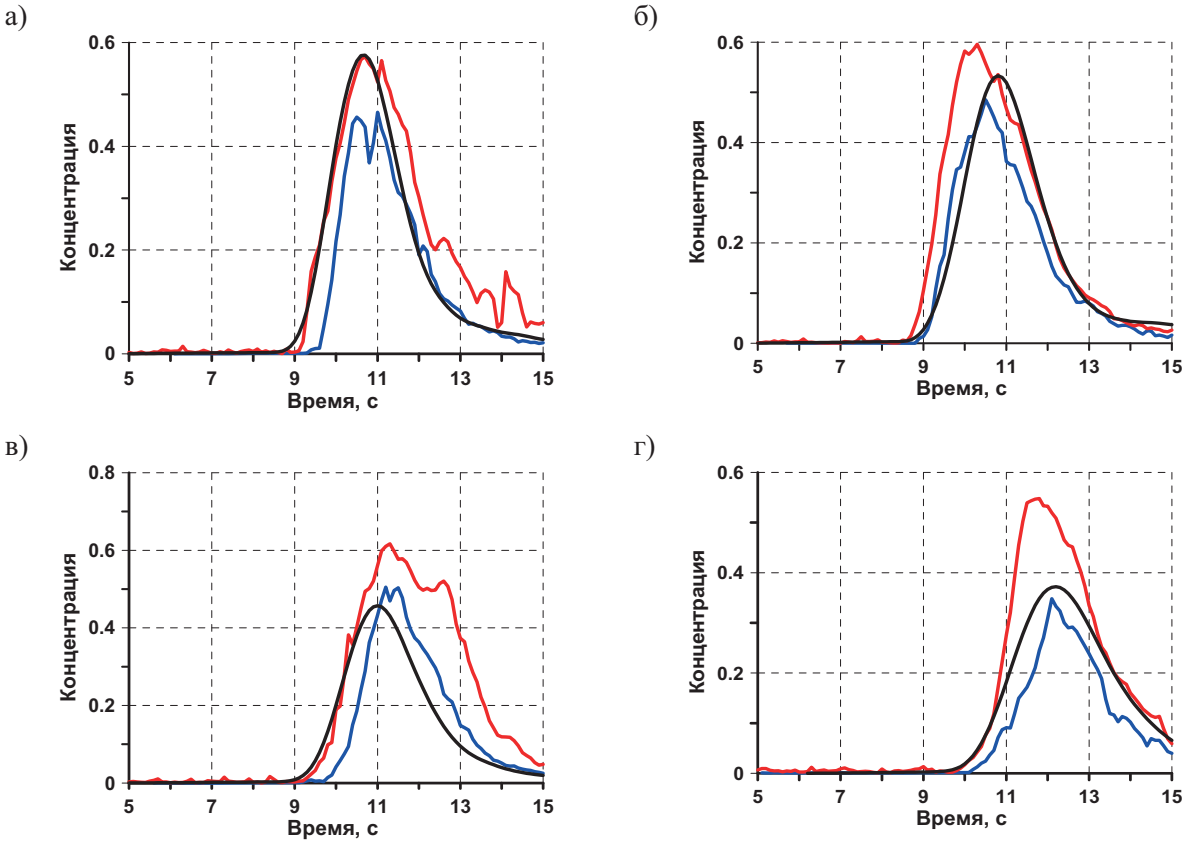

Рис. 12. Относительная концентрация соли на входе в опорные трубы для режима 1:
а) датчик 68, б) датчик 13, в) датчик 75, г) датчик 58.

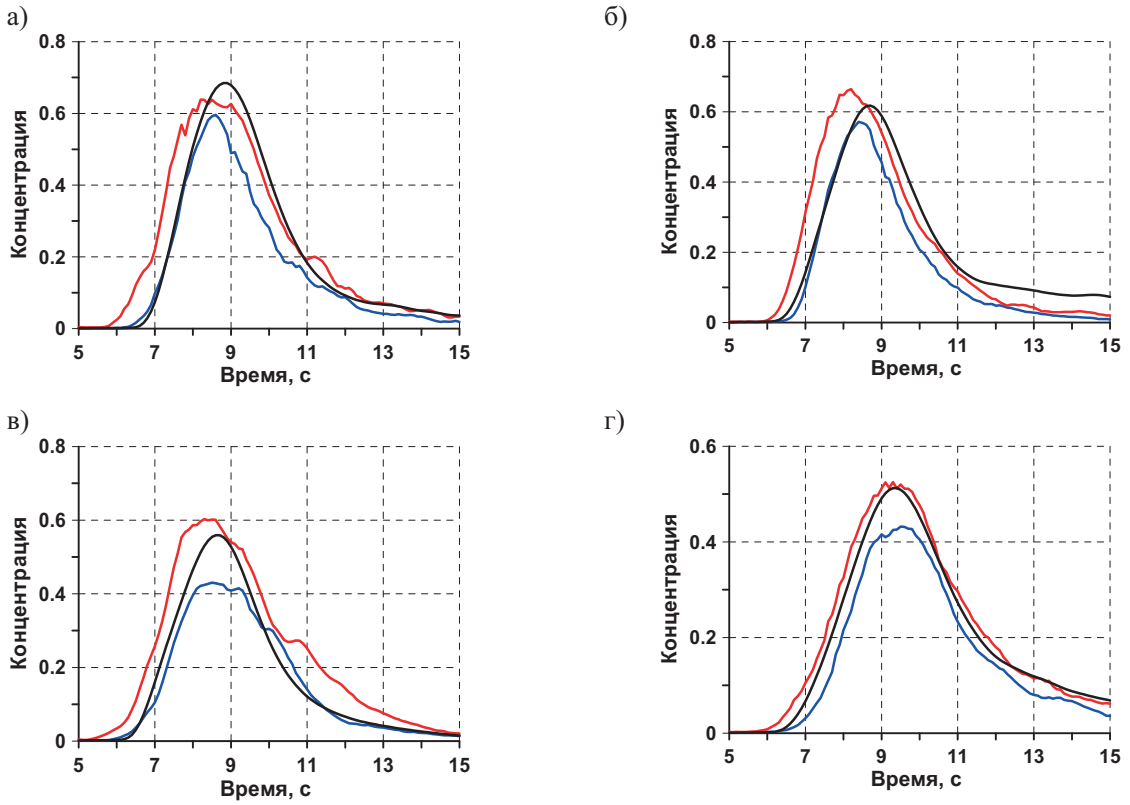

Рис. 13. Относительная концентрация соли на входе в опорные трубы для режима 2:
а) зона 1, б) зона 2, в) зона 3, г) зона 4.

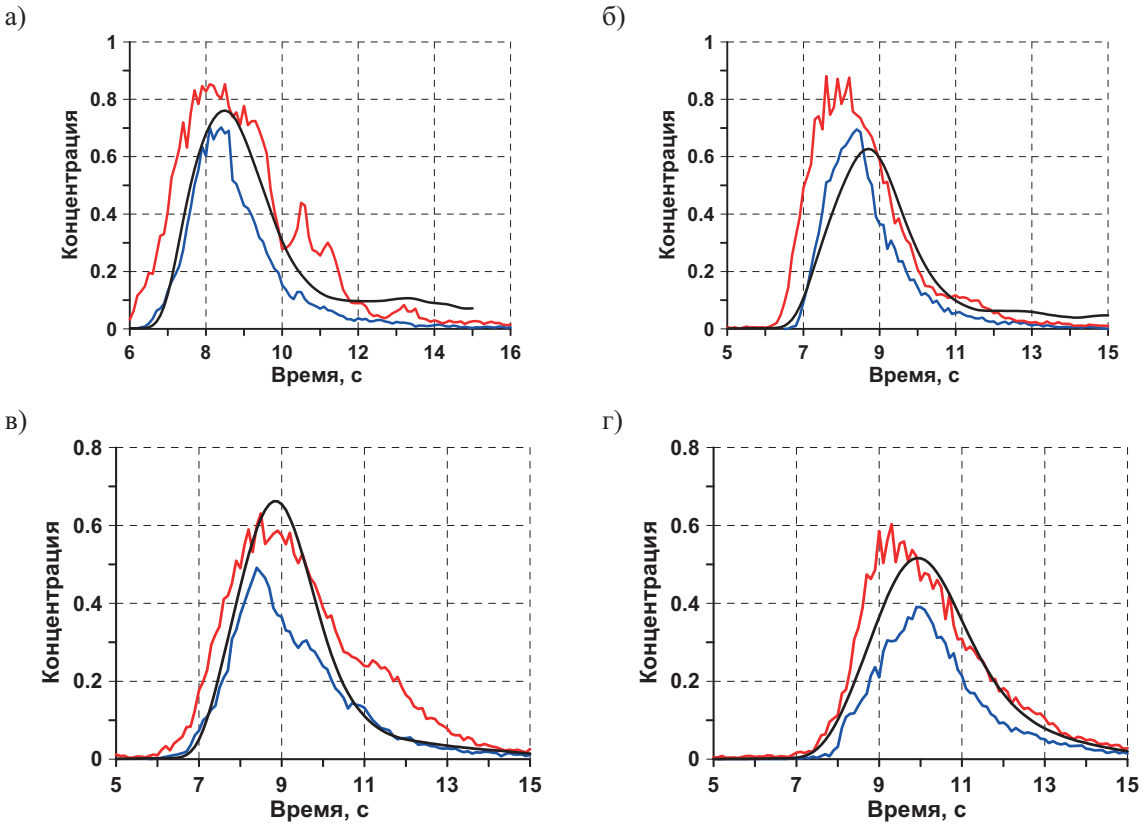

Рис. 14. Относительная концентрация соли на входе в опорные трубы для режима 2:
а) датчик 68, б) датчик 13, в) датчик 75, г) датчик 58.

На рис. 11–14 приведены три кривые: красная – максимальное значение регистрируемой относительной концентрации соли и синяя – минимальное значение относительной концентрации соли в каждый момент времени из пяти одинаковых опытов конкретного режима. Эти кривые определяют разброс экспериментальных данных. Чёрная кривая иллюстрирует результаты расчёта. Из рисунков видно хорошее согласование результатов расчётов и экспериментов.

На рис. 15 приведены средние по всем датчикам отклонения расчётных значений относительной концентрации соли от экспериментальных в каждый момент времени (отклонения для каждого датчика вычисляются по модулю).

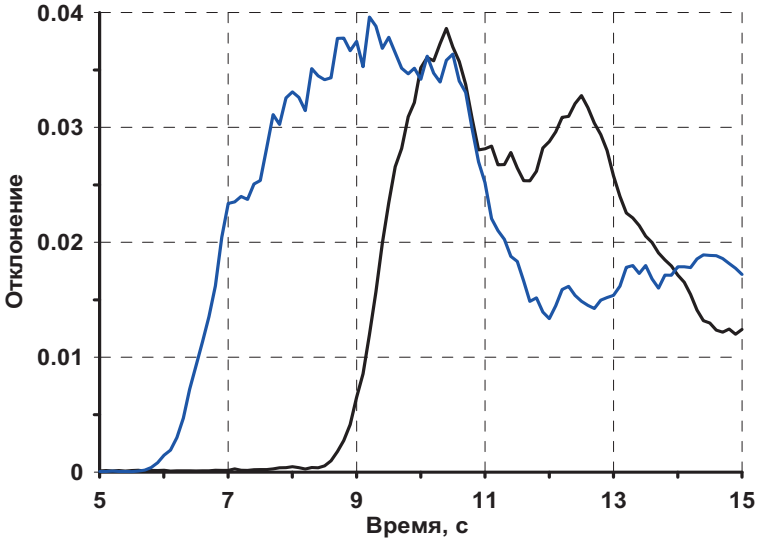

Рис. 15. Среднее по всем датчикам абсолютное отклонение расчётных и экспериментальных данных по безразмерной относительной концентрации соли:

– режим 1, – режим 2.

Абсолютные отклонения расчётных и экспериментальных данных по безразмерной относительной концентрации соли для обоих режимов не превышают величины 0.04, что составляет около 7 % от максимального значения относительной концентрации соли, регистрируемой по всем датчикам, расположенным в имитирующих трубках активной зоны.

Заключение

1. С целью верификации кода КОРСАР/CFD проведено расчётное моделирование экспериментов, выполненных на четырёхпетлевом стенде ОКБ «ГИДРОПРЕСС», по проникновению из холодной нитки «пробки» теплоносителя с повышенной концентрацией соли в активную зону при пуске одного циркуляционного насоса. Получено хорошее согласование результатов расчётов с экспериментальными данными.
2. Результаты расчётов демонстрируют анизотропное растекание жидкости в кольцевой области напорной камеры. Поступающий из патрубка поток теплоносителя движется азимутально в обе стороны, приобретая направление в нижнюю камеру при слиянии азимутальных потоков. Под патрубком работающей петли образуется область стагнации потока.
3. Анизотропная картина течения обуславливает неравномерное позонное изменение концентрации соли на входе в активную зону.

Литература

1. *Юдов Ю.В.* Численная реализация трёхмерной модели теплогидравлики на основе метода вложенной границы в расчётном коде КОРСАР/CFD / Ю.В. Юдов, С.С. Чепилко, И.Г. Данилов // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Математическое моделирование физических процессов. – 2018. – Вып. 4. – С. 46–56.
2. Объединение одномерной и трёхмерной моделей теплогидравлики в расчётном коде КОРСАР/CFD / Ю.В. Юдов, С.С. Чепилко, И.Г. Данилов, Д.С. Кастерин // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Математическое моделирование физических процессов. – 2019. – Вып. 1. – С. 57–68.
3. TACIS Project R2.02/02 “Development of safety analysis capabilities for VVER-1000 transients involving spatial variations of coolant properties (temperature or boron concentration) at core inlet”. Terms of Reference // European Commission, Europeaid Cooperation Office. 2020.
4. Отчет по результатам эксперимента и его анализу. Эксперимент 1 // Проект TACIS R2.02/02. Инв. № 320-Пр-662. ЗАО «НПО «ГИДРОПРЕСС». 2007.
5. Отчет по результатам эксперимента и его анализу. Эксперимент 2 // Проект TACIS R2.02/02. Инв. № 320-Пр-663. ЗАО «НПО «ГИДРОПРЕСС». 2007.
6. *Böttcher M.* Detailed CFX-5 study of the coolant mixing within the reactor pressure vessel of a VVER-1000 reactor during a non-symmetrical heat-up test // Nuclear Engineering and Design. 2008. V. 238. № 3. P. 445–452.
7. Validation and qualification of advanced thermal hydraulic and safety analysis tools for the safety assessment of VVER-1000 reactors / V. Sánchez, W. Jaeger, M. Böttcher, K. Ivanov, R. Stieglitz // Proceedings of the 7-th International Conference “Safety assurance of NPP with WWER”. 17–20 May 2011. Podolsk, Russia.
8. CFD analysis of a slug mixing experiment conducted on a VVER-1000 model / F. Moretti, D. Melideo, A. Del Nevo, F. D’Auria, T. Höhne, E. Lisenkov // Science and Technology of Nuclear Installations. – 2009. – V. 2009. – Article ID 436218. – 12 p.
9. *Bucalossi A.* Experimental investigation of in-vessel mixing phenomena in a VVER-1000 scaled test facility during unsteady asymmetric transients / A. Bucalossi, F. Moretti, D. Melideo, A. Del Nevo, F. D’Auria, T. Höhne, E. Lisenkov, D. Gallory // Nuclear Engineering and Design. – 2001. – V. 241. – P. 3068–3075.
10. Трёхмерное моделирование напорной камеры реактора ВВЭР-1000 в режиме с несимметричной работой петель с помощью расчётного кода КОРСАР/CFD / Ю.В. Юдов, И.Г. Петкевич, В.Г. Артемов, Д.С. Кастерин, С.Н. Румянцев // Теплоэнергетика. – 2019. – № 11. – С. 91–101.