УДК 532.542: 004.942

Расчёты по коду КОРСАР/CFD процессов перемешивания теплоносителя в модели реактора ВВЭР-1000 на стенде ОКБ «ГИДРОПРЕСС» при функционировании различного количества циркуляционных насосов

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

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

Аннотация

В статье приведено сопоставление результатов расчётов по коду КОРСАР/CFD с данными второй серии экспериментов, проведённых на четырёхпетлевом стенде ОКБ «ГИДРОПРЕСС» для модели реактора ВВЭР-1000. Эксперименты моделируют процессы перемешивания в напорной камере реактора для режимов с возмущением по температуре или концентрации борной кислоты теплоносителя в одной из петель при работе разного количества циркуляционных насосов. Продемонстрировано значимое влияние на результаты расчётов малых изменений в условиях поступления теплоносителя из патрубков (наклон патрубков на 3°) и 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 coolant mixing processes with different number of pumps in operation in the VVER-1000 reactor model at the four-loop test facility of OKB "GIDROPRESS"

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

FSUE "Alexandrov NITI", Sosnovy Bor, Leningrad region, Russia

Abstract

This paper compares the results of KORSAR/CFD calculations with data from the second series experiments carried out in the VVER-1000 reactor model at the four-loop test facility of OKB "GIDROPRESS". The experiments simulated the mixing phenomena in the reactor lower plenum under conditions of temperature or boron concentration disturbance in one of the loops with different number of coolant pumps in operation. Significant sensitivity of the calculation results to slight variations in the conditions of coolant flow from the inlet nozzles (change of nozzle inclination angle by 3°) is observed. The effect of the coolant flow pattern in the annular region 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 разрывом 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 концентрации 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 имитатора при исследовании процессов перемешивания использовался раствор соли NaCl.

В статье [4] представлены результаты верификации расчётного кода КОРСАР/CFD на основе данных первой 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.

В настоящей работе изложены результаты верификации кода по опытным данным второй серии режимов, имитирующих проникновение в активную зону через напорную камеру холодного теплоносителя или теплоносителя с пониженной концентрацией борной кислоты при возмущении по отдельным петлям циркуляционного контура.

Подробное описание стенда и выбранных для верификации экспериментальных режимов представлены в отчётах [5–8].

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 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.

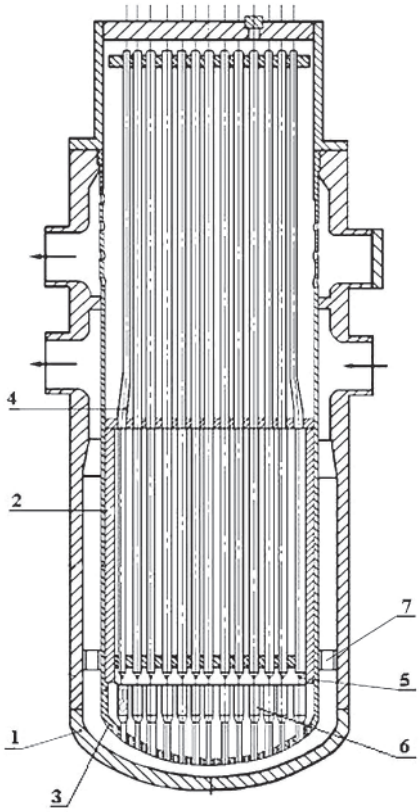


Рис. 1. Модель реактора:

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

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.

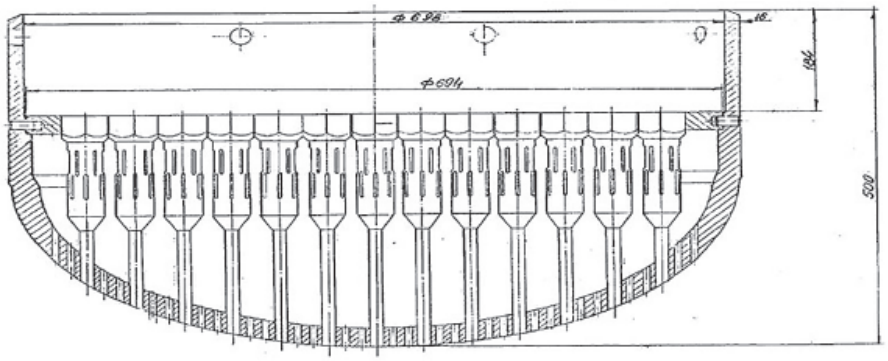


Рис. 2. Блок опорных труб

Модель реактора присоединена к четырём циркуляционным петлям. На рис. 3 схематично изображены две циркуляционные петли. Каждая петля оборудована циркуляционным насосом

с частотно-регулируемым приводом электродвигателя, что обеспечивает заданный закон выхода 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.

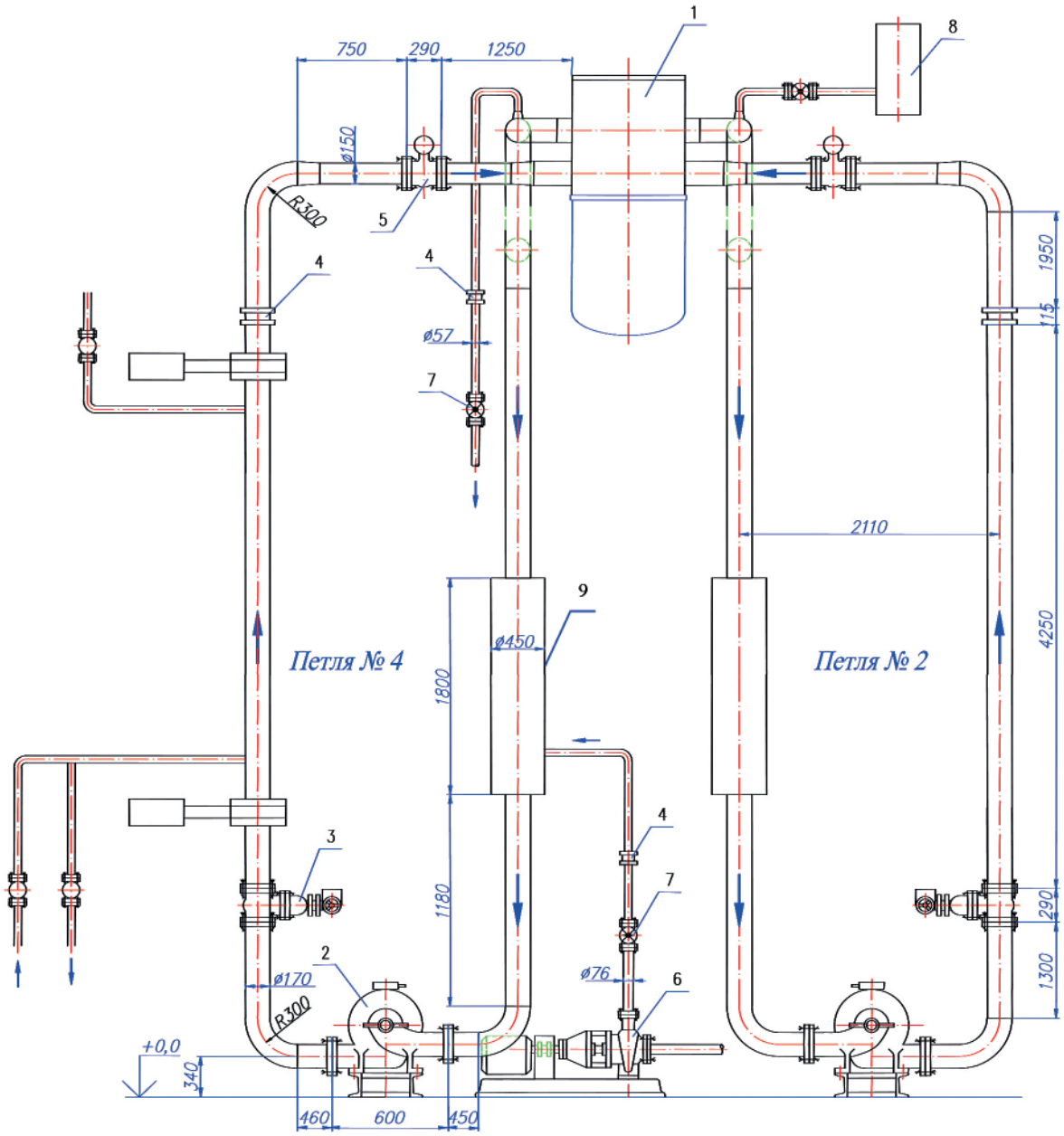


Рис. 3. Фронтальный вид экспериментальной установки:

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.

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.

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.

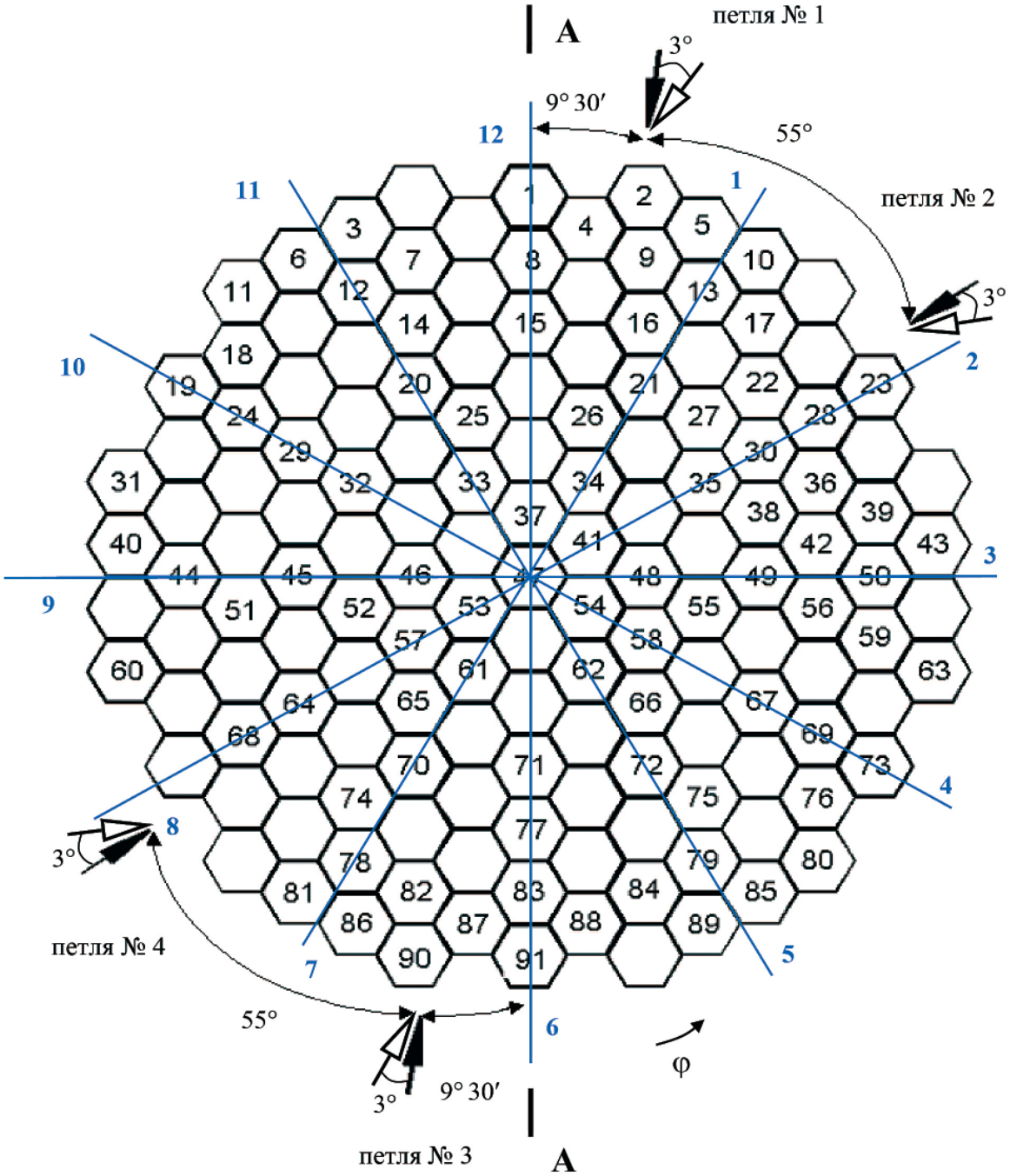


Рис. 4. Расположение кондуктометрических датчиков на выходе из опорных труб относительно петель (вид сверху)

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. Сопоставления результатов расчётов по коду КОРСАРCFD/CFD с данными двух режимов серии с пуском ГЦН изложены в работе [4].

Вторая серия режимов из пяти экспериментов имитирует возмущения по одной из петель при работе разного количества ГЦН и при ЕЦ по всем петлям (этот режим исключен из матрицы верификации). Возмущения задавались подачей в петлю концентрированного раствора из бака солевого раствора в течение 60 с с расходом 14 м^3/ч. При этом расходы по петлям составляли 172 м^3/ч. Особенностью этой серии экспериментов является поступление фронта воды с повышенной концентрацией соли в активную зону в виде ярко выраженных секторов. Исключение составляет режим с одним работающим насосом, в котором солевой раствор распространяется равномерно по сечению активной зоны. Он также не включен в матрицу верификации.

Сопоставление расчётных и экспериментальных данных осуществляется по усредненным показаниям датчиков, расположенных в двенадцати секторах с углом разворота 30°. На рис. 4. синими лучами отмечены границы расположения этих секторов, а синими цифрами – их нумерация. В каждый сектор включены все датчики, лежащие целиком либо частично между ограничивающими данный сектор лучами.

В табл. 1 приведена матрица верификации по экспериментальным данным второй серии режимов на четырёхпетлевом стенде ОКБ «ГИДРОПРЕСС».

Таблица 1

Матрица верификации второй серии режимов

Порядковый номер	Номер режима	Описание режима
1	6	Работают ГЦН всех петель. Подача солевого раствора в петлю 4.
2	8	Работают ГЦН петель 1, 2, 4. Отключен ГЦН петли 3. Подача солевого раствора в петлю 2.
3	9	Работают ГЦН петель 1, 2. Отключены ГЦН петель 3, 4. Подача солевого раствора в петлю 2.

Каждый экспериментальный режим повторялся пять раз, то есть выполнялись пять 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).

В модели учитываются опоры шахты. При моделировании экспериментов ось x декартовой системы координат направлена симметрично между патрубками петель 1 и 2 (симметричная сетка). Ось z имеет направление вверх вдоль оси модели реактора. Расчётная сетка содержит 8.5 миллиона одинаковых ячеек. Декартовы ячейки имеют практически форму куба с длиной рёбер около 3 мм.

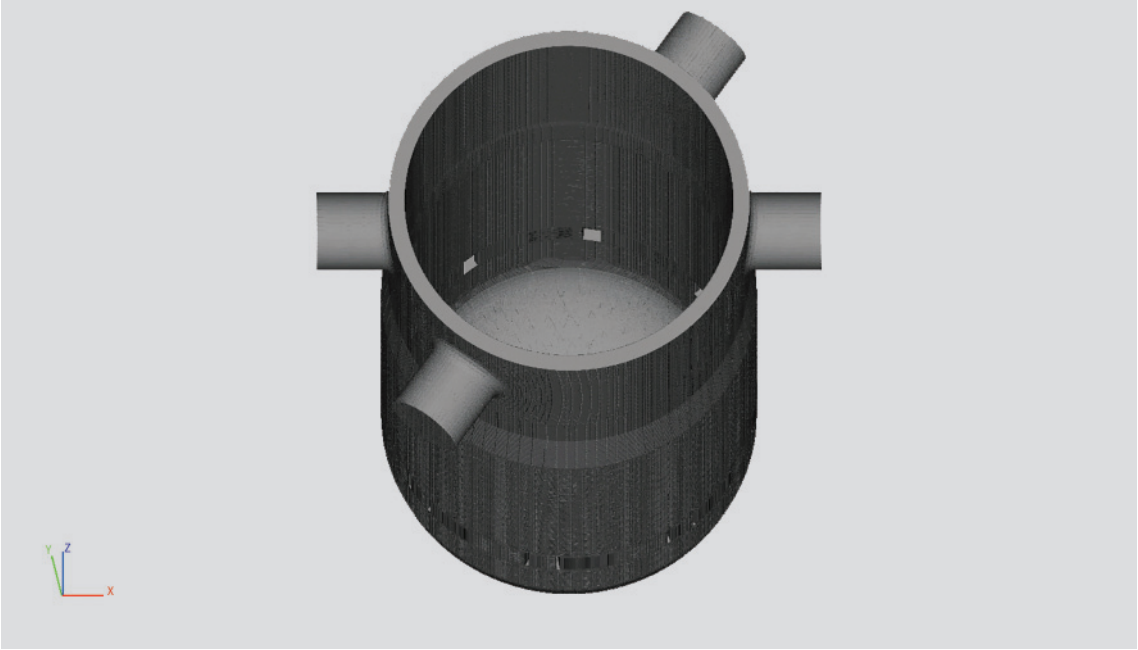
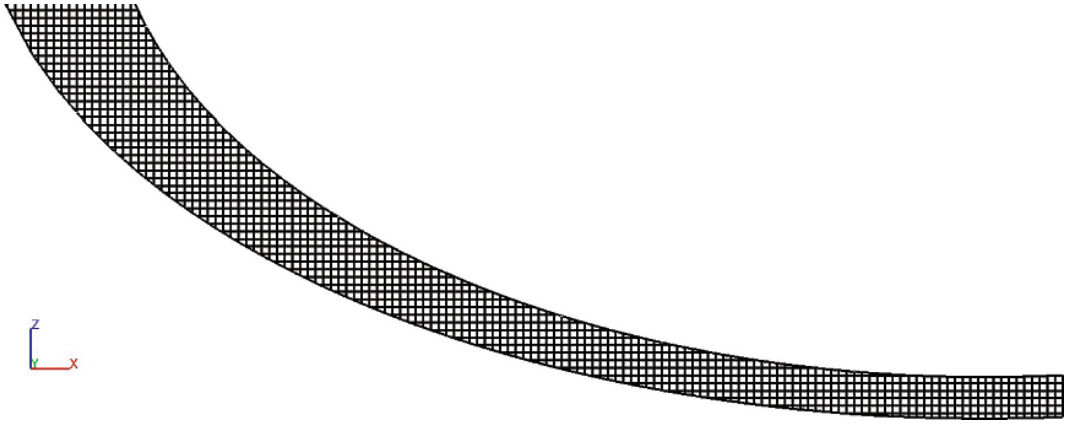


Рис. 5 – Трёхмерная область моделирования

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.

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 шестигранных каналов, соответствующих 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.

а)



б)

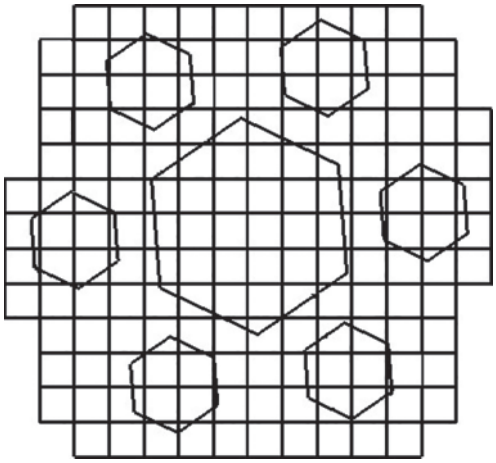


Рис. 6. Фрагменты расчётной сетки вблизи эллиптического днища шахты:
а) сечение xz; б) связка 3D и 1D областей.

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

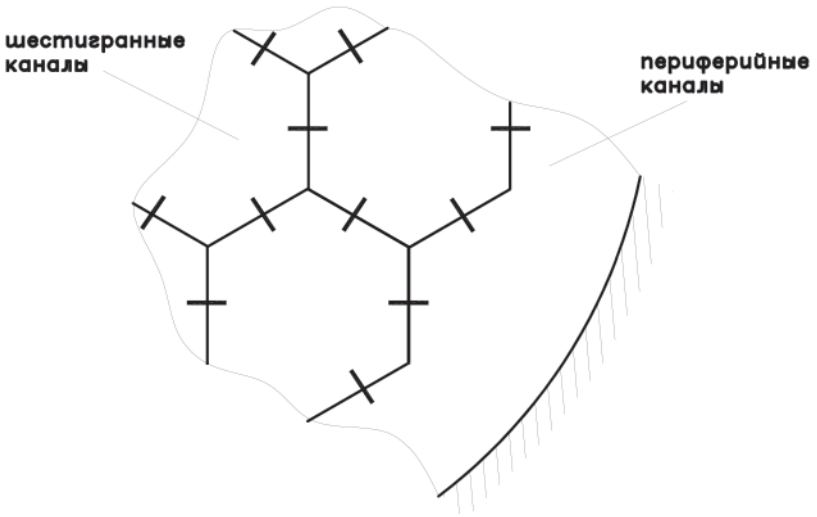


Рис. 8. Поперечные связи ячеек каналов нижней камеры (сечение В-В на рис. 7)

Использование одномерных элементов при нодализации нижней камеры реактора, затесненной металлическими конструкциями, эквивалентно применению модели пористого тела в этой области [9, 10].

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 четырёх ячеек трёхмерной области, а диаметром 18 мм приблизительно 20 ячеек (см. рис. 6).

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.

Для оценки сеточной зависимости результатов были выполнены дополнительные расчёты с использованием трёх сеток:

– несимметричной сетки, когда ось x направлена из патрубка петли 4 в патрубок петли 2 (при сохранении размера ячеек, общее количество ячеек составляло 6.7 миллиона);
– с измельчением симметричной и несимметричной сеток в 1.5 раза по координатным направляющим x и y (мелкие сетки).

Изменения концентрации соли на входе в патрубки по времени для второй серии экспериментов задавались 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:

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

где $T_0 = 293{,}15$ K; $T_1 = 303{,}15$ K.

Расчёты с исходной симметричной сеткой 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 трёхмерной постановке турбулентная вязкость рассчитывалась по алгебраической модели.

Сопоставление результатов расчётов и экспериментов

Можно выделить три стадии поступления концентрации соли в активную зону (в опорные трубы) данной серии экспериментов. На первой стадии происходит рост и стабилизация концентрации в виде сектора вследствие достижения фронта из патрубка петли, в которую подается солевой раствор. На второй стадии наблюдается дальнейшее увеличение концентрации за счет ее прироста во входных патрубках после оборота теплоносителя по циркуляционным петлям. Третья стадия характеризуется снижением концентрации в секторе и ее выравниванием по всему сечению активной зоны при прекращении подачи солевого раствора из бака. Экспериментальные данные по изменению во времени относительной концентрации соли на входе в патрубки работающих петель для режимов показаны на рис. 9.

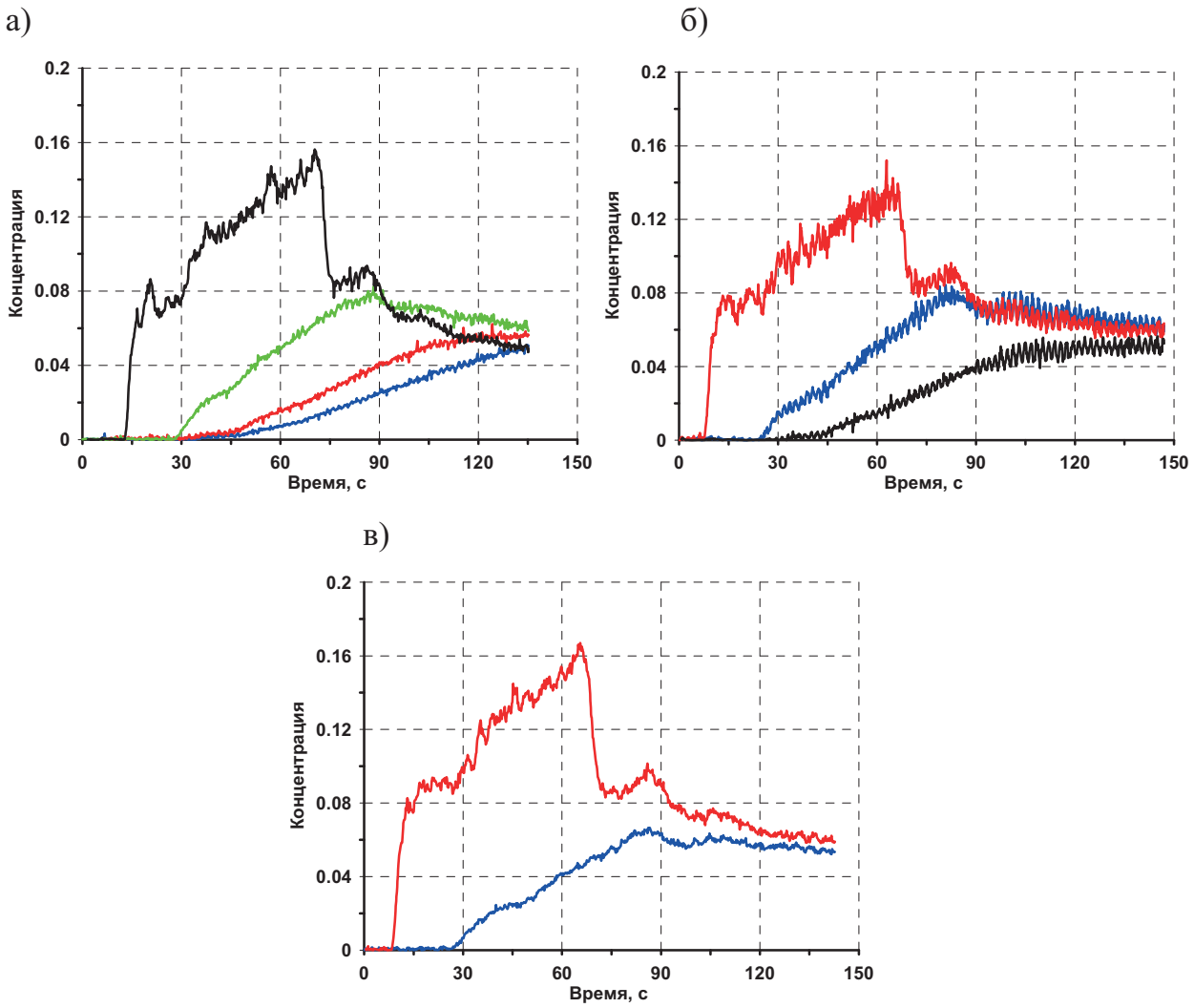


Рис. 9 – Экспериментальные изменения относительной концентрации соли во входных патрубках петель:
а) режим 6; б) режим 8; в) режим 9.

– 1 петля, – 2 петля, – 3 петля, – 4 петля

Расположение секторов поступления концентрации соли в опорные трубы определяется картиной течения теплоносителя в кольцевой области камеры. Результаты расчётов по коду КОРСАР/CFD, представленные в [4, 11, 12], показывают, что поступающий из патрубков поток теплоносителя движется в азимутальном направлении в обе стороны от патрубков. В продольном направлении камеры под патрубками образуется область стагнации потока. При работе

четырёх ГЦН в режиме 6 растекающиеся по окружности кольцевой области потоки сливаются между патрубками и образуется четыре симметричные и направленные вниз в активную зону потока жидкости (два между ближними патрубками и два между дальними патрубками). При работе трёх ГЦН (режим 8) потоки жидкости устремляются к нижней камере в трёх зонах. Две зоны расположены между работающими петлями, как и в случае с четырьмя включенными насосами. Отличие заключается в том, что поток между дальними петлями смещен по азимуту в сторону неработающей петли, поскольку часть жидкости покидает напорную камеру через неработающую петлю. Третья зона образуется около неработающей петли в секторе между дальними работающей и неработающей петлями. Когда работают два смежных насоса в режиме 9, формируются два симметричных потока теплоносителя в нижнюю камеру. Один, значительно более интенсивный, – между работающими патрубками, второй, менее интенсивный, – между противоположными патрубками. В работе [12] приведены поля скорости в напорной камере реактора ВВЭР-1000, подтверждающие позонное поступление теплоносителя в активную зону. По результатам расчётов по коду KOPCAP/CFD во всех режимах серии наблюдается азимутальное смещение (поворот) секторов поступления концентрации соли по часовой стрелке на 20°–50° относительно экспериментальных данных.

Дополнительно к базовым расчётам были проведены расчёты с наклоном осей всех четырёх входных патрубков в напорную камеру на 3° в плоскости их расположения по часовой стрелке (рис. 4), что существенно улучшило согласование опытных и расчётных данных. На рис. 10 и в табл. 2 представлено сопоставление положения секторов в исследуемых режимах в конце первой стадии стабилизации распределения концентрации по опорным трубам.

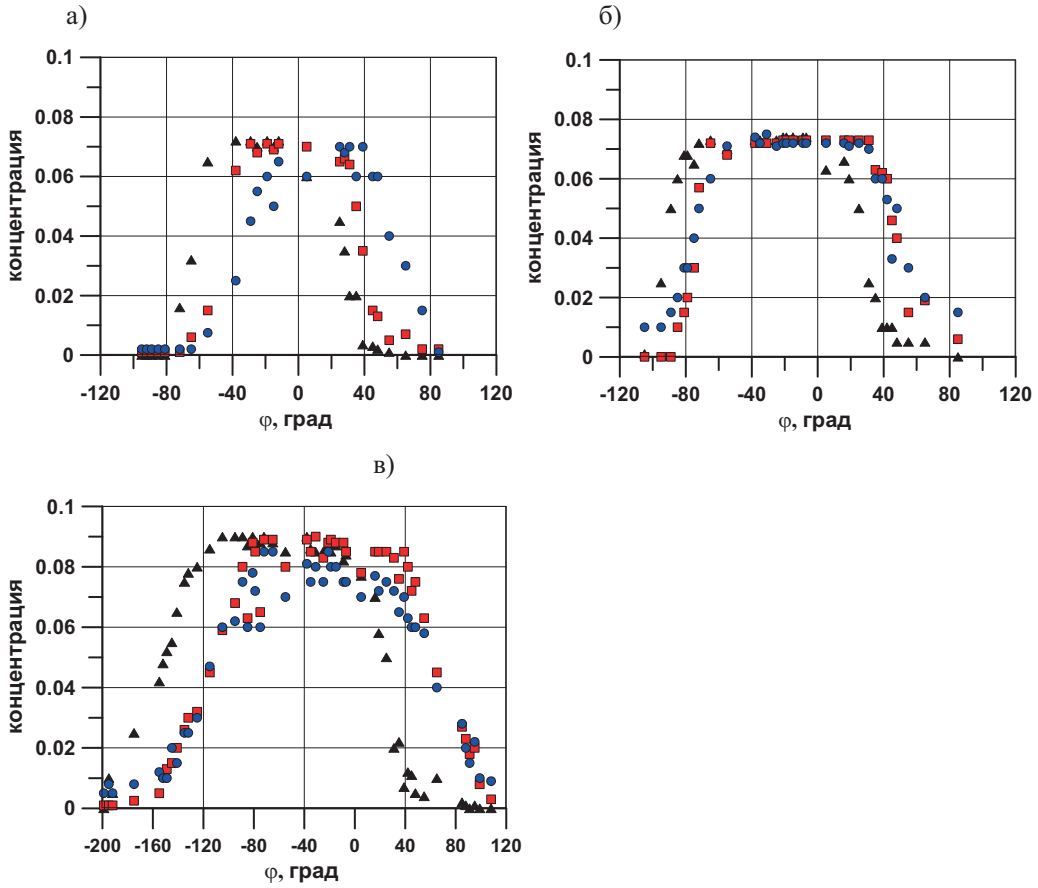


Рис. 10 – Сектора проникновения концентрации соли в опорные трубы на первой стадии режимов: а) режим 6; б) режим 8; в) режим 9:

● – эксперимент, ▲ – базовый расчет, ■ – расчет с наклоном патрубков.

На рис. 10 показаны распределения средних значений относительной концентрации соли по угловому положению датчиков φ от оси модели реактора. Угловое положение датчиков отсчитывается от оси патрубка с возмущением по концентрации против часовой стрелки (рис. 4). Погрешности в табл. 2 приведены относительно угла разворота секторов в экспериментах. Можно констатировать, что погрешность по границам секторов при переходе от базовых расчётов к расчётам с поворотом патрубков в режиме 6 уменьшилась с 28 % до 14 %, в режиме 8 с 16 % до 5 %, а в режиме 9 с 18 % до 4 %.

Следует отметить, что малый наклон патрубков на 3° вызвал значительные изменения в расчётном положении секторов проникновения концентрации: в режиме 6 – до 20°, в режиме 8 – до 30°, а в режиме 9 – до 50°. Данный эффект, вероятно, проявляется вследствие передавливания против часовой стрелки зон поступления теплоносителя в опорные трубы. Сохранившееся отличие расчётных и экспериментальных результатов в режиме 6, возможно, объясняется большим, чем на 3° наклоном патрубка петли 4.

Таблица 2

Положение секторов поступления концентрации соли в опорные трубы на первой стадии

Режим		Эксперимент, град (°)	Расчёт базовый		Расчёт с наклоном патрубков	
			Значение, град (°)	Погрешность, %	Значение, град (°)	Погрешность, %
6	Начало сектора	-60	-80	-14	-70	-7
	Конец размывания	-10	-50	-28	-30	-14
	Начало размывания	40	0	-28	20	-14
	Конец сектора	80	40	-28	60	-14
	Общий угол разворота	140	120	-14	130	14
8	Начало сектора	-90	-100	-5	-90	0
	Конец размывания	-60	-70	-5	-70	-5
	Начало размывания	30	20	-5	30	0
	Конец сектора	90	60	-16	90	0
	Общий угол разворота	180	160	-11	180	0
9	Начало сектора	-170	-200	-11	-170	0
	Конец размывания	-80	-120	-14	-90	0
	Начало размывания	40	0	-14	40	-4
	Конец сектора	110	60	-18	110	0
	Общий угол разворота	280	260	-7	280	0

В качестве примера на рис. 11–13 для каждого режима продемонстрированы изменения по времени концентрации соли на границах секторов проникновения в активную зону. Приведены экспериментальные и расчётные данные по осредненным значениям датчиков в выбранных для анализа секторах, отмеченных на рис. 4, на краях секторов распространения концентрации и по отдельным датчикам в них. Экспериментальные кривые отмечены красным и синим цветами: красный – максимальное значение регистрируемой величины, синий – минимальное значение в каждый момент времени из пяти одинаковых опытов конкретного режима. Эти кривые определяют разброс экспериментальных данных (экспериментальную трубку). Расчётные кривые выделены черным (базовый) и зеленым (с наклоном патрубков) цветами. На рисунках отчётливо видна неустойчивость процесса перемешивания в режиме 9 на дальней от патрубка петли 2 границе сектора концентрации. Она проявляется на первых двух стадиях режима. При использовании мелкой симметричной сетки неустойчивость значительно уменьшается (оранжевые кривые на рис. 13).

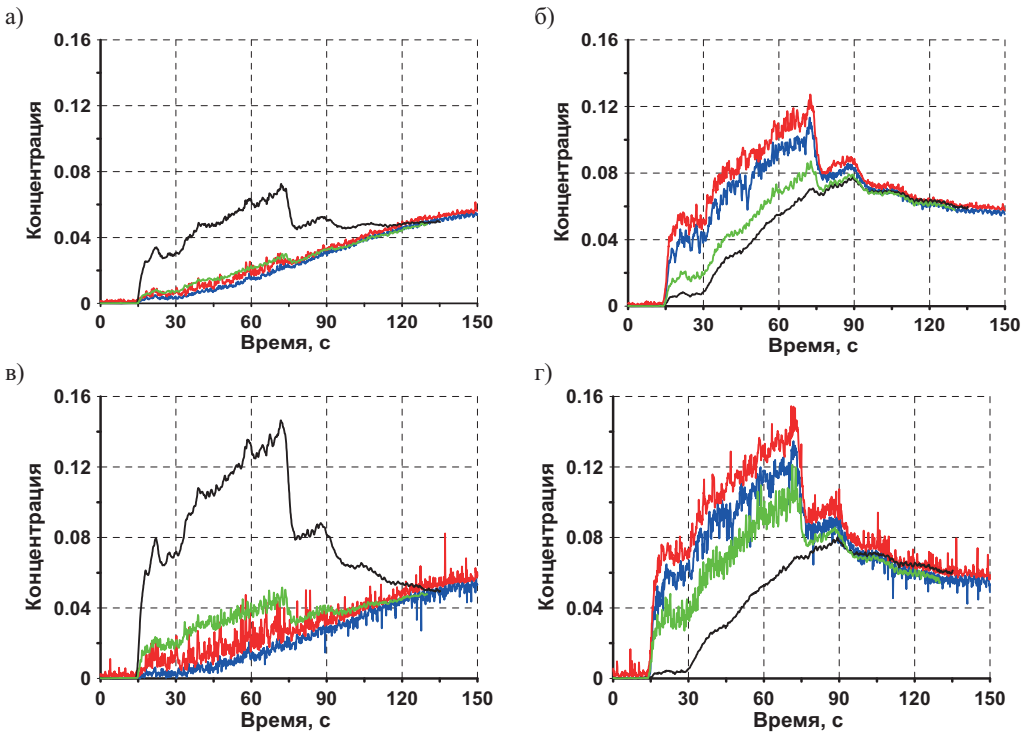


Рис. 11 – Относительная концентрация соли в режиме 6:
а) сектор 11; б) сектор 7; в) датчик 19; г) датчик 86.

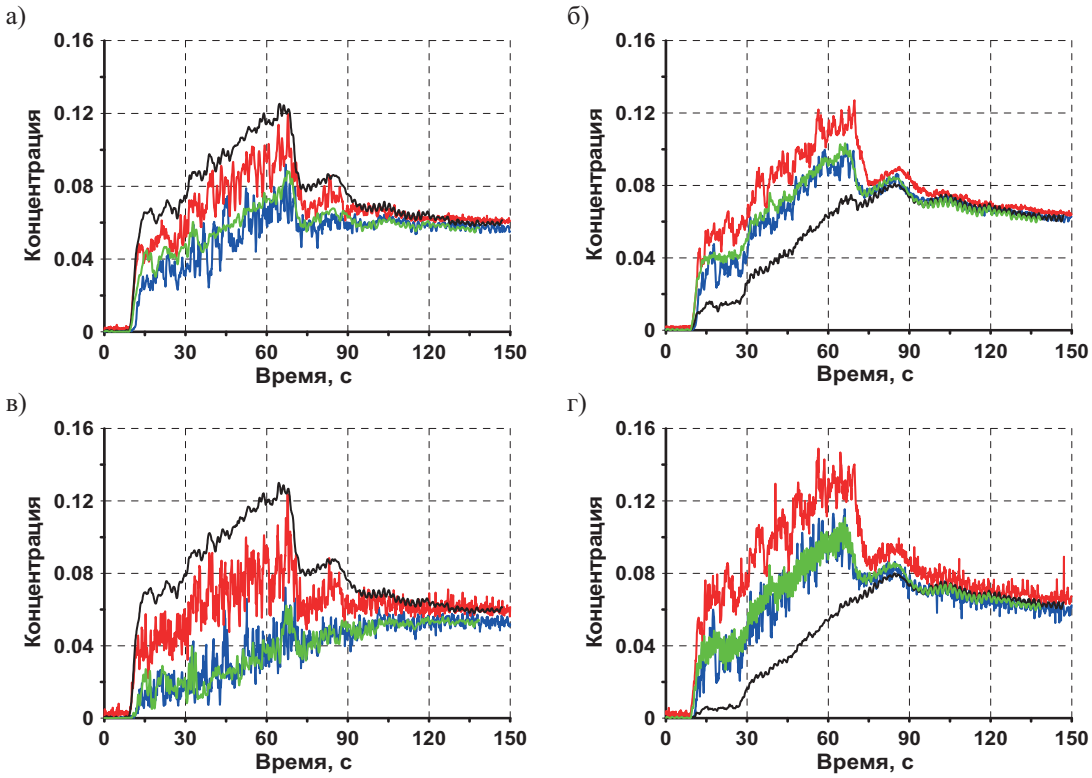


Рис. 12 – Относительная концентрация соли в режиме 8:
а) сектор 5; б) сектор 1; в) датчик 85; г) датчик 2.

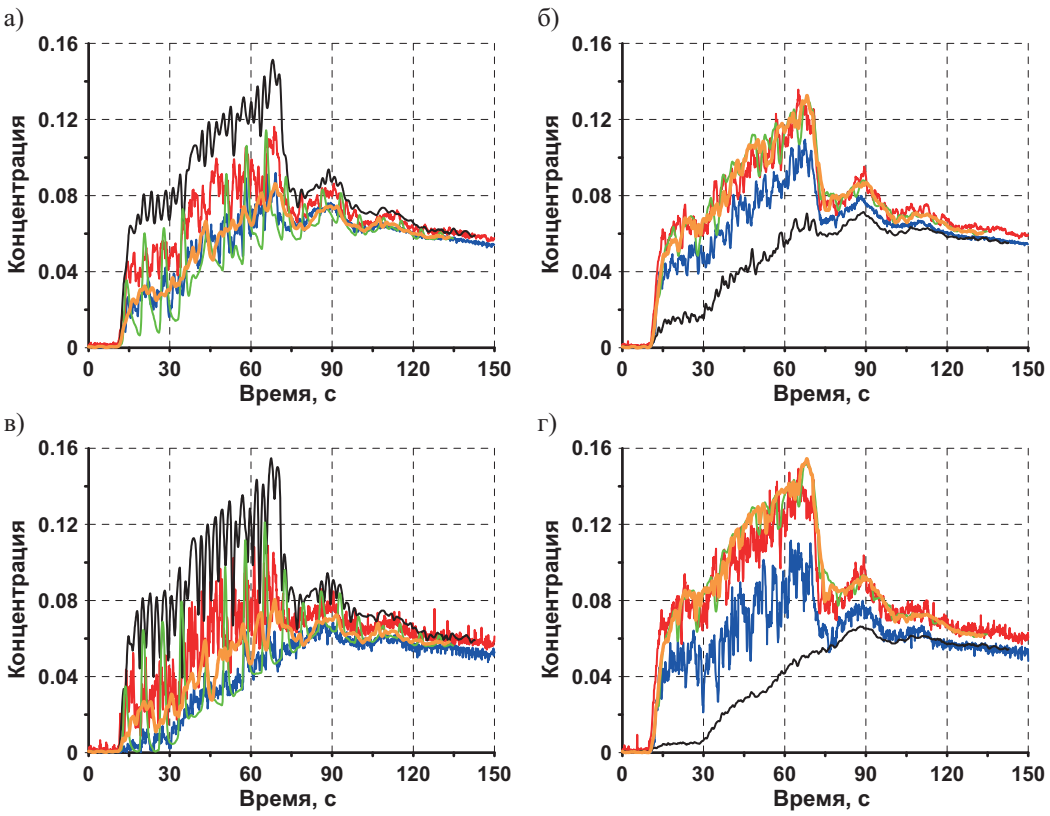


Рис.13 – Относительная концентрация соли в режиме 9:

а) сектор 7; б) сектор 1; в) датчик 86; г) датчик 2.

На рис. 14 для режимов 6, 8 и 9 приведены средние по всем датчикам абсолютные (по модулю) отклонения расчётных значений относительной концентрации соли от экспериментальных трубок в каждый момент времени. Как следует из рисунка, отклонения от экспериментальных трубок уменьшились в расчётах с наклонным патрубком по сравнению с базовыми расчётами в два раза. Максимальные отклонения в конце второй стадии режимов на 70 с в расчётах с наклоном патрубков составляют примерно 0.0075 для режимов 6, 9 и 0.005 для режима 8. Эти отклонения соответствуют 4.7 % и 3.1 % от пикового значения концентрации в экспериментах (порядка 0.16).

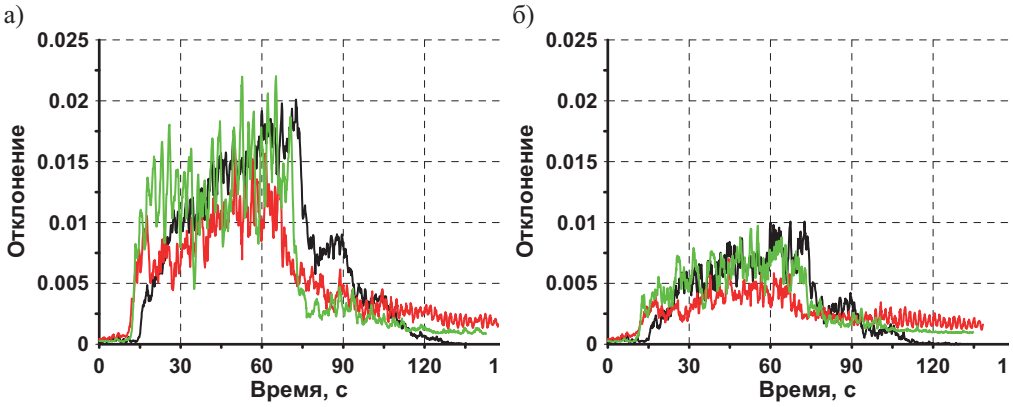


Рис. 14 – Отклонения расчётных данных от экспериментальных:

а) расчёт базовый б) расчёт с наклоном патрубков

– режим 6, – режим 8, – режим 9

Для оценки влияния сетки были проведены сопоставления результатов расчётов режимов 8 и 9 (в варианте с наклоном патрубков), проведенных на четырёх сетках: исходной несимметричной, мелкой несимметричной, исходной симметричной и мелкой симметричной. Наибольшие отличия были получены при расчёте режима 9. На рис. 15 показаны расчётные кривые изменения концентрации соли на входе в опорные трубы с датчиками 88 и 2 для различных сеток. Видно, что при использовании несимметричной исходной сетки значительно усиливается закрутка потока в кольцевой области против часовой стрелки относительно данных на симметричной сетке. Однако этот эффект существенно уменьшается при измельчении сетки. Расчётные данные по изменению концентрации, полученные на исходной и мелкой симметричных сетках, достаточно хорошо согласуются. Причем, как упоминалось ранее, при измельчении сетки практически исчезает численная неустойчивость процесса перемешивания на границе сектора распространения концентрации. В целом, из анализа рис. 15 можно констатировать наличие сеточной сходимости результатов расчётов.

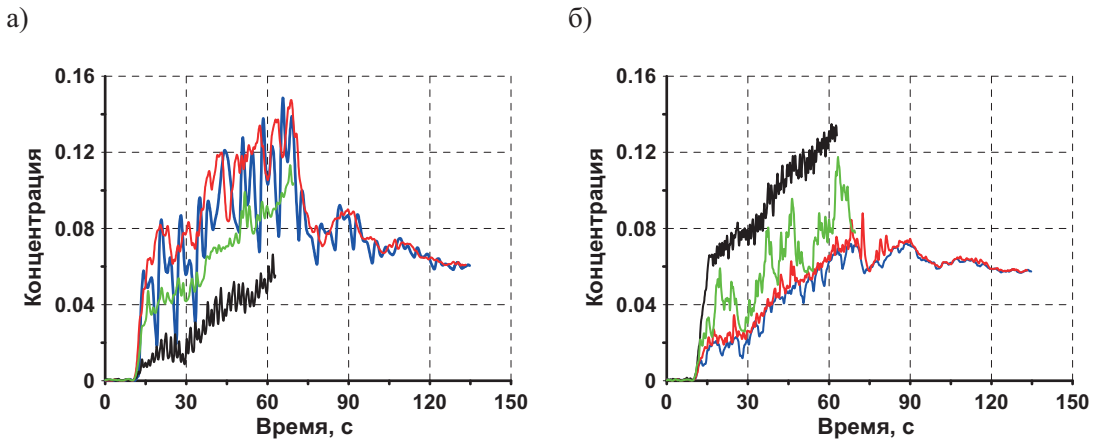


Рис. 15 – Влияние сетки на результаты расчёта режима 9 с наклоном патрубков:

а) датчик 88; б) датчик 2

– исходная несимметричная сетка, – мелкая несимметричная сетка,
– исходная симметричная сетка, – мелкая симметричная сетка

Заключение

1. С целью верификации кода KOPCAP/CFD проведено расчётное моделирование экспериментов, выполненных на четырёхпетлевом стенде ОКБ «ГИДРОПРЕСС» по проникновению из холодной нитки теплоносителя с повышенной концентрацией соли в активную зону при функционировании различного количества циркуляционных насосов.
2. Выявлено азимутальное смещение (поворот) расчётных секторов проникновения концентрации на 20°–50° по часовой стрелке относительно экспериментальных данных.
3. При незначительном наклоне патрубков в плоскости их расположения на 3° по часовой стрелке получено хорошее согласование результатов расчётов с экспериментальными данными.
4. Подтверждена сходимость результатов расчётов при измельчении сетки в трёхмерной области моделирования.

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, И.Г. Данилов, С.С. Чепилко, 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. 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 // Технологии обеспечения жизненного цикла ядерных энергетических установок: научно-технический сборник. – 2020. – Вып. № 1 (19). – С. 40–53.
5. Отчёт по результатам эксперимента и его анализу. Эксперимент 1 // Проект TACIS R2.02/02. Инв. № 320-Пр-662 / ЗАО «НПО «ГИДРОПРЕСС». – 2007.
6. Отчёт по результатам эксперимента и его анализу. Эксперимент 6 // Проект TACIS R2.02/02. Инв. № 320-Пр-667 / ЗАО «НПО «ГИДРОПРЕСС». – 2007.
7. Отчёт по результатам эксперимента и его анализу. Эксперимент 8 // Проект TACIS R2.02/02. Инв. № 320-Пр-669 / ЗАО «НПО «ГИДРОПРЕСС». – 2007.
8. Отчёт по результатам эксперимента и его анализу. Эксперимент 9 // Проект TACIS R2.02/02. Инв. № 320-Пр-670 / ЗАО «НПО «ГИДРОПРЕСС». – 2007.
9. *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.
10. 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.
11. *Юдов Ю.В*. Расчётные исследования растекания теплоносителя в кольцевой камере при радиальном вводе через патрубок / Ю.В. Юдов, С.Н. Румянцев, С.С. Чепилко // Технологии обеспечения жизненного цикла ядерных энергетических установок: научно-технический сборник. – 2020. – Вып. № 3 (21). – С. 32–41.
12. 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.