

## ТРЕХМЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПОРНОЙ КАМЕРЫ РЕАКТОРА ВВЭР-1000 В РЕЖИМАХ С НЕСИММЕТРИЧНОЙ РАБОТОЙ ПЕТЕЛЬ С ПОМОЩЬЮ РАСЧЕТНОГО КОДА КОРСАР/CFD

© 2019 г. Ю. В. Юдов<sup>a</sup>, \*, И. Г. Петкевич<sup>b</sup>, В. Г. Артемов<sup>a</sup>, Д. С. Кастрерин<sup>b</sup>, С. Н. Румянцев<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Научно-исследовательский технологический институт им. А.П. Александрова;  
188540, Россия, Ленинградская обл., г. Сосновый Бор, Копорское шоссе, д. 72

<sup>b</sup>ОКБ “Гидропресс”, 142103, Россия, Московская обл., г. Подольск, ул. Орджоникидзе, д. 21

\*e-mail: yudov@niti.ru

Поступила в редакцию 13.03.2019 г.

После доработки 08.04.2019 г.

Принята к публикации 29.05.2019 г.

Код KORSCAP/CFD является развитием системного кода KORSCAP/GP, аттестованного в 2009 г. в Ростехнадзоре применительно к расчетному обоснованию безопасности реакторных установок ВВЭР. Один из важных аспектов развития заключается во внедрении в функциональное наполнение кода CFD-модуля для моделирования методом вложенной границы пространственных турбулентных течений в смесительных камерах реакторов в RANS-приближении. CFD-модуль объединен с одномерной моделью по полунеявной схеме как типовой элемент кода. Приведены результаты расчетов по коду KORSCAP/CFD трех режимов с несимметричной работой оборудования петель циркуляционного контура реакторной установки ВВЭР-1000: разрыв паропровода парогенератора, подключение главного циркуляционного насоса при исходной работе трех насосов на мощности реактора 71% номинальной, подключение насоса при исходной работе двух противоположных насосов на мощности 52% номинальной. Расчеты проведены на основе файла входных данных для энергоблока АЭС с ВВЭР-1000 специалистов главного конструктора реакторных установок ВВЭР ОКБ “Гидропресс”. Осуществлено трехмерное моделирование связанных нейтронно-физических и теплогидравлических процессов в активной зоне реактора. Использованы теплогидравлическая модель активной зоны в поканальном приближении и программный блок трехмерного расчета нейтронной кинетики. В рассматриваемых задачах трехмерная область моделирования для CFD-модуля включала в себя четыре входных патрубка и часть напорной камеры реактора до входа в отверстия эллиптического днища шахты. Отверстия в эллиптическом днище и область за шахтой вплоть до выходных патрубков представлялись элементами одномерной модели. На основе результатов расчетов проведен анализ картины течения теплоносителя в напорной камере реактора. Показано влияние картины течения на динамику распределения температуры жидкости на входе в тепловыделяющие сборки активной зоны и мощности энерговыделения по тепловыделяющим сборкам в моделируемых режимах.

**Ключевые слова:** реакторная установка ВВЭР-1000, напорная камера, активная зона, теплогидравлика, расчетный код, трехмерная модель, турбулентность

**DOI:** 10.1134/S0040363619110109

При расчетном обосновании безопасности водо-водяных энергетических реакторов (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 (ПГ), с подключением главного циркуляци-

онного насоса (ГЦН) ранее не работавшей 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 (ТВС) активной зоны. Динамика и распределение возмущений определяются в зна-

чительной мере процессами перемешивания в напорной камере реактора.

Одним из инструментов для расчетного обоснования безопасности ВВЭР является системный расчетный код KORCAP/GP, аттестованный в Ростехнадзоре в 2009 г. [1]. Основу функционального наполнения кода составляет одномерная (1D) двухжидкостная модель контурной теплогидравлики [2]. Заложенные в коде возможности позволяют осуществлять пространственное моделирование сопряженных теплогидравлических (в поканальном приближении) и нейтронно-физических процессов в активной зоне. Упрощенное описание теплогидравлических процессов в напорной камере снижает уровень обоснованности результатов расчета режимов с несимметричной работой оборудования реакторных установок (РУ). Применение квазитрехмерного "гидравлического" приближения с многоканальным моделированием камеры и установлением между каналами поперечных связей дает лишь грубую картину явлений и зависит от подбора заранее неизвестных значений гидравлических сопротивлений.

В последние годы для повышения уровня моделирования процессов в напорной камере реактора используются трехмерные (3D) CFD-коды. Предложено много технологий объединения посредством интегрирующих оболочек независимо разработанных коммерческих системных и CFD-кодов, например связки TRACE-CFX [3], RELAP5-CFX [4], CATHARE-TRIO\_U [5], RELAP5-STAR-CCM+ [6], ATHLET-ANSYS CFX [7]. Все они базируются на обмене данными по граничным условиям в конце временного шага. Обмен данными реализован либо по явной схеме [3, 4], либо по полуявной схеме с использованием итераций [3, 5–7]. В первом случае возникают проблемы устойчивости, во втором – проблемы сходимости итераций.

Для учета трехмерных эффектов в напорной камере реакторов специалистами НИТИ им. А.П. Александрова по заказу ОКБ "Гидропресс" разработан CFD-модуль в составе кода KORCAP/GP. Этот модуль основан на методе вложенной границы в идеологии обрезанных декартовых ячеек [8] и адаптирован как типовой элемент для новой версии расчетного кода KORCAP/CFD. При этом связи с элементами одномерной модели реализованы по полуявной схеме. Поле давления на новом временном слое в ячейках 1D- и 3D-моделей рассчитывается с использованием мономатричного подхода. При расчете объединенного поля давления применяется многосеточный метод в трехмерной и одномерной областях, что существенно улучшает сходимость итерационного процесса [9]. Проведена верификация объединения 1D- и 3D-модулей кода KORCAP/CFD по данным

эксперимента, проведенного в ОКБ "Гидропресс" на модели реактора ВВЭР-1000, с поступлением пробки деборированной воды (моделировалась раствором соли) в активную зону при пуске одного ГЦН [10].

В статье приведены результаты расчетов по коду KORCAP/CFD трех режимов с несимметричной работой оборудования петель циркуляционного контура реакторной установки ВВЭР-1000: разрыв паропровода ПГ;

подключение ГЦН при исходной работе трех ГЦН на мощности реактора 71% номинальной;

подключение ГЦН при исходной работе двух противоположных ГЦН на мощности 52% номинальной.

Расчеты проведены на основе файла входных данных реакторной установки с ВВЭР-1000 специалистов главного конструктора РУ ВВЭР ОКБ "Гидропресс", в котором квазитрехмерная модель напорной камеры заменена на трехмерную модель в CFD-приближении.

По результатам расчетов режимов с использованием 3D-модели камеры проведен анализ картины течения жидкости в напорной камере и ее влияния на распределение температуры теплоносителя на входе в активную зону и, в конечном счете, на динамику поля энерговыделения по ТВС.

## РАСЧЕТНАЯ МОДЕЛЬ РЕАКТОРНОЙ УСТАНОВКИ

Расчетная модель реакторной установки ВВЭР-1000 базируется на файле входных данных для кода KORCAP/GP, разработанного специалистами ОКБ "Гидропресс". Единственная модификация касается реализации пространственных эффектов в напорной камере реактора. Вместо многоканального гидравлического приближения используется CFD-модуль.

Трехмерная область моделирования включает в себя четыре входных патрубка и напорную камеру реактора между корпусом и шахтой (рис. 1). В модели учитываются образцы-свидетели и опоры шахты. Расчетная сетка содержит более 9 млн одинаковых декартовых ячеек. Ось  $x$  декартовой системы координат направлена перпендикулярно оси реактора вдоль линии симметрии между ближними патрубками (в сечении A-A), ось  $y$  – вдоль линии симметрии между дальними патрубками, ось  $z$  – вверх вдоль оси реактора. Размеры ячеек составляют  $0.0149 \times 0.0166 \times 0.0162$  м.

Фрагменты расчетной сетки вблизи днища шахты приведены на рис. 2. На рис. 2, б окружности представляют проекции 978 отверстий диаметром 0.04 м для прохода теплоносителя, расположенные в эллиптическом днище шахты. Отверстия моделируются 1D-элементами "канал" (обозначение ch) с одной ячейкой. Сечения отвер-

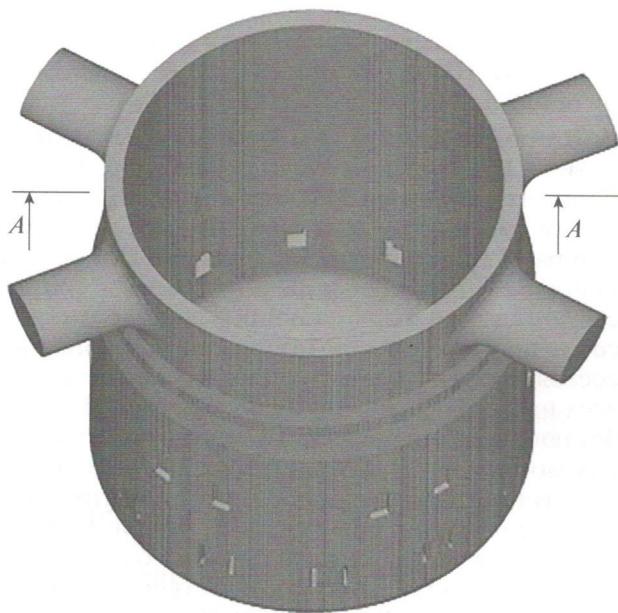


Рис. 1. Трехмерная область моделирования

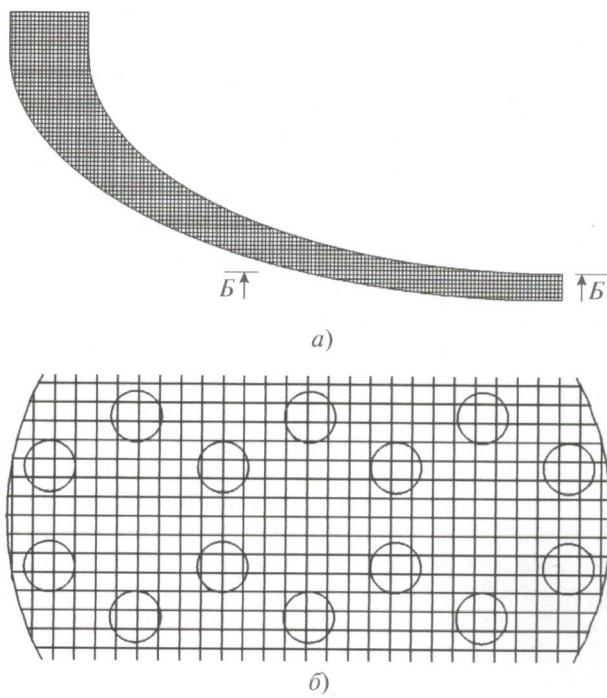


Рис. 2. Фрагменты расчетной сетки вблизи эллиптического днища шахты.

*a* – сечение А–А (см. рис. 1); *б* – сечение Б–Б (см. рис. 2, *а*)

стий нижней огибающей эллиптического днища шахты являются общими границами между 3D- и 1D-областями, через которые осуществляется связка 3D- и 1D-моделей. Из рис. 2 видно, что уз-

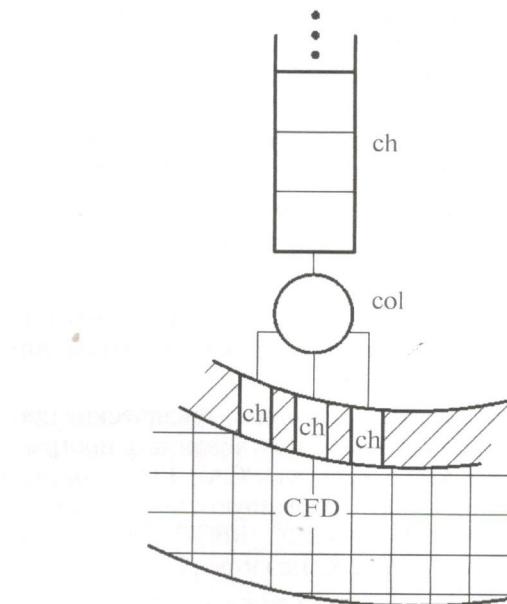


Рис. 3. Схемастыковки 3D- и 1D-областей моделирования на входе в отверстия в эллиптическом днище

кая часть области моделирования между корпусом и эллиптическим днищем шахты вдоль оси реактора включает в себя семь расчетных ячеек, а сечение каждого отверстия пересекает более трех ячеек трехмерной области.

Стыковка 3D- и 1D-областей схематично изображена на рис. 3. Группы из шести отверстий посредством 1D-элементов расчетной схемы кода KORCOP/CFD “коллектор” (обозначены *col*) объединены с соответствующими 163 шестигранными каналами, моделирующими ТВС активной зоны. Обогреваемая часть активной зоны представлена двадцатью ячейками по ее высоте. Следует отметить, что шестигранные каналы дополнительно моделируют блок опорных труб до входа в активную зону, а также пространство в сборной камере с блоком защитных труб вплоть до крышки реактора. Ячейки этих каналов связаны поперечными связями (за исключением активной зоны), т.е. описание теплогидравлических процессов в нижней камере реактора за шахтой и сборной камере осуществляется в квазитрехмерном поканальном гидравлическом приближении с использованием одномерных элементов расчетной схемы. Такой подход в затесненных твердотельными конструкциями областях реактора эквивалентен модели пористого тела. Стыковки патрубков с холодными нитками петель формируют четыре дополнительные границы между 3D- и 1D-областями.

В расчетной схеме в 1D-приближении представлены детально все четыре циркуляционные петли I контура, включая горячие нитки, горячие коллекторы ПГ, трубные пучки ПГ, холодные

коллекторы ПГ, холодные нитки и ГЦН, а также дыхательный трубопровод и компенсатор давления. Моделируется основное оборудование II контура:

внутрикорпусное пространство ПГ (с помощью точечных элементов кода “пароводяной сосуд”);

система питательной воды;

паропроводы вплоть до турбины;

главный паровой коллектор.

Кроме того, учитывается функционирование всех систем безопасности и основных систем нормальной эксплуатации.

Пространственные нейтронно-физические процессы моделируются с использованием программного блока КАРТА кода КОРСАР/ГП, исходные данные для которого формируются комплексом программ САПФИР\_95&RC\_BBЭР. Этот комплекс аттестован в Ростехнадзоре [11, 12].

Расчеты выполнялись в режиме параллельных вычислений с использованием 289 процессов (один процесс для 1D-области моделирования и пространственной кинетики, 288 процессов для 3D-области). Шаг интегрирования по времени составлял  $10^{-3}$  с. В 3D-модели использовалась относительно простая алгебраическая модель турбулентности, в которой принимается, что динамическая скорость  $u_t$  пропорциональна модулю касательной составляющей скорости потока к стенке  $u_r$ , т.е.

$$u_t = \sqrt{\tau_w / \rho} \approx u_r / \gamma, \quad (1)$$

где коэффициент  $\gamma = 27$ ;  $\rho$  – плотность среды.

Тогда касательное напряжение на стенке

$$\tau_w \approx \rho u_t^2 / \gamma^2, \quad (2)$$

а турбулентная динамическая вязкость рассчитывается по соотношению [13]

$$\mu_t \approx \rho u_t d / 20 \approx \rho u_t d / (20\gamma), \quad (3)$$

где  $d$  – гидравлический диаметр проточной части.

## МОДЕЛИРУЕМЫЕ РЕЖИМЫ

Расчеты проведены для трех режимов реакторной установки ВВЭР-1000 с несимметричной работой петель циркуляционного контура.

Первый режим (режим 1) моделирует разрыв паропровода одного из ПГ. Он характеризуется снижением давления в аварийном ПГ, что приводит к увеличению отвода тепла от I контура во II контур. Как следствие, температура теплоносителя на входе в напорную камеру из аварийной петли уменьшается. Первый сигнал на сброс аварийной защиты по снижению давления в ПГ в расчетах не учитывается. Аварийная защита срабатывает по второму сигналу, вызванному увеличением

мощности реактора по показаниям ионизационных камер аппаратуры контроля нейтронного потока (АКНП) на 7% номинальной с учетом погрешности измерений АКНП.

Второй режим (режим 2) моделирует подключение ГЦН при исходной работе трех ГЦН на мощности реактора 71% номинальной, а третий режим (режим 3) – подключение ГЦН при исходной работе двух противоположных ГЦН на мощности 52% номинальной. Эти режимы соответствуют ситуациям ошибочного подключения насосов при допустимой мощности стационарного состояния реакторной установки при работе не всех насосов. Плановое подключение ГЦН неработающей петли должно осуществляться на уровнях мощности 30 и 20% для режимов 2 и 3 соответственно. Предполагается, что оператор допустил единичную ошибку, подключая ГЦН без предварительного снижения мощности. Дополнительно постулируется отсутствие срабатывания аварийной защиты по сигналу увеличения мощности. В исходном стационарном состоянии через петлю с неработающим ГЦН теплоноситель движется в обратном направлении от напорной камеры к сборной камере. При включении насоса происходит реверс расхода и холодная пробка из горячей нитки по этой петле поступает в напорную камеру. Следует отметить, что в режимах 1 и 2 в момент поступления холодной жидкости в напорную камеру работают все четыре насоса и картина течения в камере симметричная. В режиме 3 течение является более сложным, несимметричным, поскольку работают только три насоса.

Перед выполнением расчетов режимов был проведен дополнительный расчет номинального состояния реакторной установки для установления коэффициентов местных гидравлических сопротивлений вдоль тракта течения теплоносителя по данным перепадов давления на участках контура циркуляции. Для каждого режима выполняли два расчета: первый – в целях получения исходного стационарного состояния, второй – для моделирования непосредственно динамики режима. Включение насоса в расчетах динамики режимов 2 и 3 осуществлялось увеличением относительной скорости вращения рабочего колеса линейно от 0 до 1 за 9 с.

## АНАЛИЗ КАРТИНЫ ТЕЧЕНИЯ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ В НАПОРНОЙ КАМЕРЕ

В процессе верификации кода КОРСАР/CFD по данным эксперимента на модели реактора ВВЭР-1000 при пуске одного циркуляционного насоса [10], проведенного в ОКБ “Гидропресс”, была выявлена следующая картина течения теплоносителя в напорной камере. Поступающий поток теплоносителя из входного патрубка распространяется по обеим полуокружностям кольцевой об-

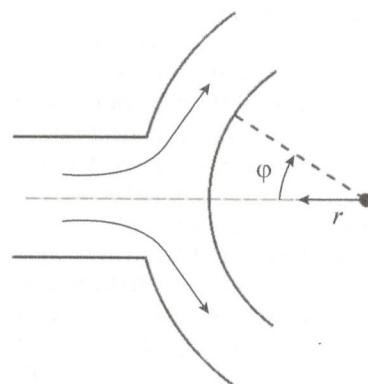


Рис. 4. Цилиндрическая система координат в кольцевой области напорной камеры

ласти к противоположной стороне, постепенно приобретая вертикальную составляющую скорости, направленную к нижней камере. При этом под патрубком работающей петли образуется область стагнации потока. Такая картина течения подтверждается расчетами этого эксперимента по коммерческому коду ANSYS CFX [14].

Чтобы объяснить превалирующее растекание жидкости по окружности, уравнения сохранения количества движения применительно к кольцевой области вблизи патрубка работающей петли в цилиндрической системе координат можно записать в виде (рис. 4):

$$u_r \frac{\partial u_r}{\partial r} + u_\varphi \frac{\partial u_r}{\partial l} = \frac{u_\varphi^2}{r} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r}, \quad (4)$$

$$u_r \frac{\partial u_\varphi}{\partial r} + u_\varphi \frac{\partial u_\varphi}{\partial l} = -\frac{u_r u_\varphi}{r} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial l}, \quad (5)$$

где  $u_r$ ,  $u_\varphi$  — радиальная и азимутальная составляющая скорости соответственно;  $\partial l = r \partial \varphi$ ;  $p$  — давление.

Система уравнений (4), (5) отличается от системы уравнений для плоского канала наличием в правой части членов, представляющих центро斯特ремительное ускорение [уравнение (4)] и конвективное вращательное ускорение при радиальном перемещении жидкости [уравнение (5)]. Эти ускорения можно трактовать как дополнитель-

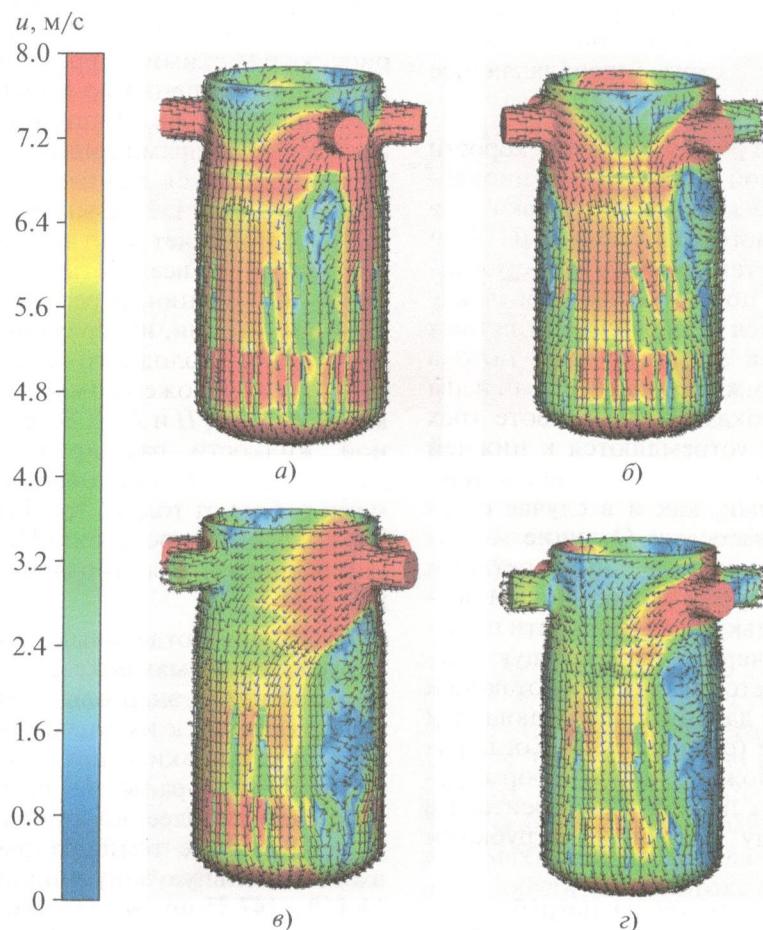
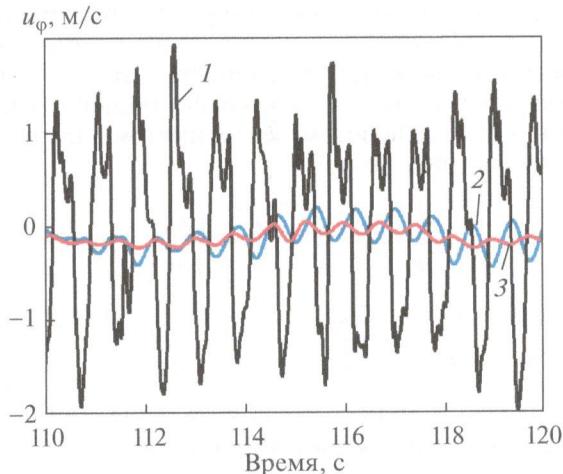


Рис. 5. Картина течения теплоносителя в напорной камере (распределения вектора скорости). В работе ГЦН: а — четыре; б — три (дан вид между дальними работающими петлями); в — три (дан вид между дальними работающей и неработающей петлями); г — два противоположных



**Рис. 6.** Изменение окружной скорости теплоносителя в точках мониторинга (в центре кольцевой области и на расстоянии 2.95 м от оси патрубков).

Точка мониторинга: 1 – под патрубками; 2 – между ближними патрубками; 3 – между дальними патрубками

ные инерционные силы: центробежная и вращательная соответственно. Центробежная сила способствует повышению давления у поверхности корпуса реактора, вращательная обуславливает анизотропное растекание струи, преобладающее по окружности камеры, поскольку  $u_r < 0$ .

На рис. 5 изображены расчетные поля скорости теплоносителя в напорной камере для стационарных условий работы реакторной установки при функционировании разного количества ГЦН. При работе четырех ГЦН растекающиеся по окружности кольцевой области потоки сливаются между патрубками и образуются четыре симметричных и направленных вниз в активную зону потока жидкости (два между ближними патрубками и два между дальними патрубками). При работе трех ГЦН потоки жидкости устремляются к нижней камере в трех зонах. Две зоны расположены между работающими петлями, как и в случае с четырьмя включенными насосами. Отличие заключается в том, что поток между дальними петлями смешен по азимуту в сторону неработающей петли (см. рис. 5, б), поскольку часть жидкости покидает напорную камеру через неработающую петлю. Третья зона образуется около неработающей петли в секторе между дальними работающей и неработающей петлями (см. рис. 5, в). Когда работают два противоположных насоса, формируются два симметричных потока теплоносителя в нижнюю камеру между дальними патрубками (см. рис. 5, г).

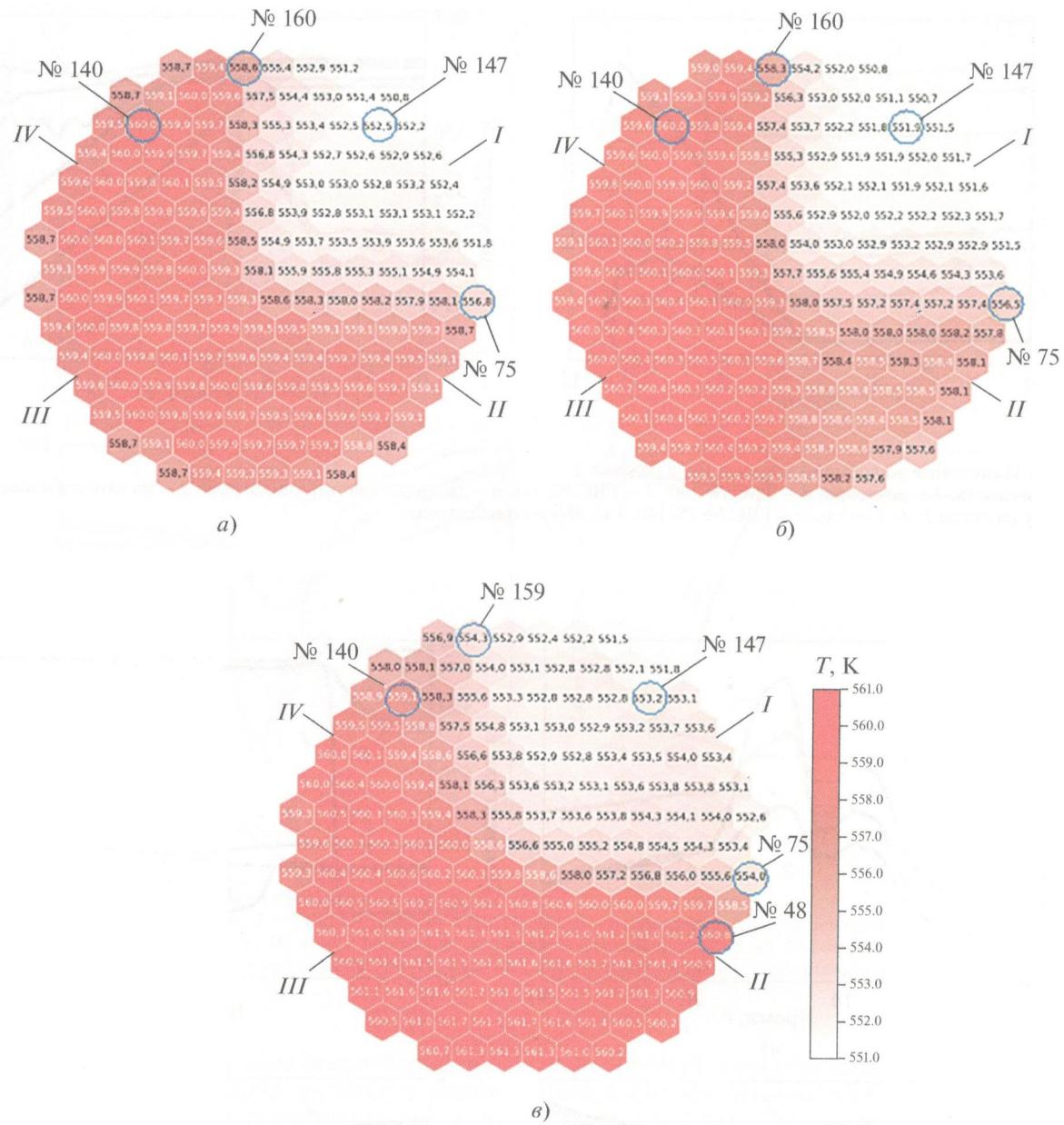
При столкновении потоков из патрубков со стенкой шахты происходит крупномасштабная турбулизация теплоносителя, которая напрямую моделируется кодом. На рис. 6 приведены графи-

ки изменения азимутальной скорости при работе реакторной установки вnomинальном режиме в трех точках мониторинга в центре кольцевой области на расстоянии 2.95 м от оси патрубков. Интенсивность турбулентности под патрубками составляет примерно 1 м/с. При удалении от патрубков она существенно уменьшается: до 0.2 м/с между ближними патрубками и 0.1 м/с между дальними патрубками. Период турбулентных пульсаций составляет около 1 с. Следует отметить, что наличие ярко выраженных токов и крупномасштабной турбулентности нивелирует значимость выбора моделей турбулентности для результатов расчетов, что продемонстрировано в работе [10]. Поэтому в представленных расчетах используется простая алгебраическая модель.

## ДИНАМИКА ПАРАМЕТРОВ В МОДЕЛИРУЕМЫХ РЕЖИМАХ

На рис. 7 приведены картограммы расчетного распределения температуры теплоносителя на входе в ТВС (в первой ячейке шестиграных каналов области активной зоны) для выбранных режимов в моменты времени перед сбросом стержней аварийной защиты (режим 1) и максимально разброса температуры (режимы 2, 3). На этом рисунке римскими цифрами показана нумерация петель. Возмущения во всех режимах задавались по первой петле. Дополнительно кружками и арабскими цифрами выделены ТВС, для которых далее приводятся данные по динамике параметров. В режимах 1, 2 “язык” холодной жидкости из петли I проникает в активную зону, когда скорости вращения всех четырех ГЦН имеют номинальные значения, и реализуется симметричная картина течения, изображенная на рис. 5, а. Поэтому сектор холодного теплоносителя составляет  $90^\circ$  и расположен симметрично между патрубками петель I, II и I, IV. В режиме 3 сектор холодной жидкости расширен до  $120^\circ$  в сторону дальней петли IV, поскольку к этому моменту времени работают только три ГЦН (см. рис. 5, б, в). Невключенным остается ГЦН петли III. Небольшое расширение сектора наблюдается и в сторону петли II.

Изменение отдельных параметров в рассматриваемых режимах показано на рис. 8–10. Значения мощности энерговыделения на этих рисунках приведены к их значениям при работе реакторной установки вноминальном режиме. Для сравнения выбраны две симметрично расположенные, наиболее энергонапряженные при равномерном поле температуры теплоносителя на входе в активную зону тепловыделяющие сборки № 140 и 147. Причем для этих ТВС выводятся значения мощности в третьей ячейке области активной зоны с максимальным энерговыделением. При поступлении холодной жидкости из петли I в



**Рис. 7.** Распределение температуры теплоносителя на входе в активную зону в моменты времени перед сбросом стержней аварийной защиты.

*a* – режим 1 в момент времени 10 с; *b* – режим 2 в момент времени 15 с; *c* – режим 3 в момент времени 13 с

напорную камеру ТВС № 147 находится внутри сектора проникновения холодного теплоносителя, а ТВС № 140 – вне этого сектора.

В режиме 1 увеличение мощности обусловлено захолаживанием активной зоны вследствие линейного уменьшения по времени температуры воды, поступающей из аварийной петли. Рост мощности происходит до момента сброса стержней аварийной защиты. При этом максимальные значения энерговыделения в ТВС № 140 и 147 различаются примерно в 1.3 раза. Изменение

температуры на входе в эти ТВС отображено на рис. 8, б. На этом же рисунке приведены зависимости от времени температуры теплоносителя на входе в ТВС № 75 и 160 на границах холодного сектора. Колебания температуры на входе в ТВС № 75 (как и в ТВС на границах секторов в других режимах) обусловлены наличием крупномасштабной турбулизации потока (см. рис. 6).

В режимах 2, 3 присутствуют две стадии подъема мощности реактора. Первая вызвана увеличением расхода теплоносителя через активную зону

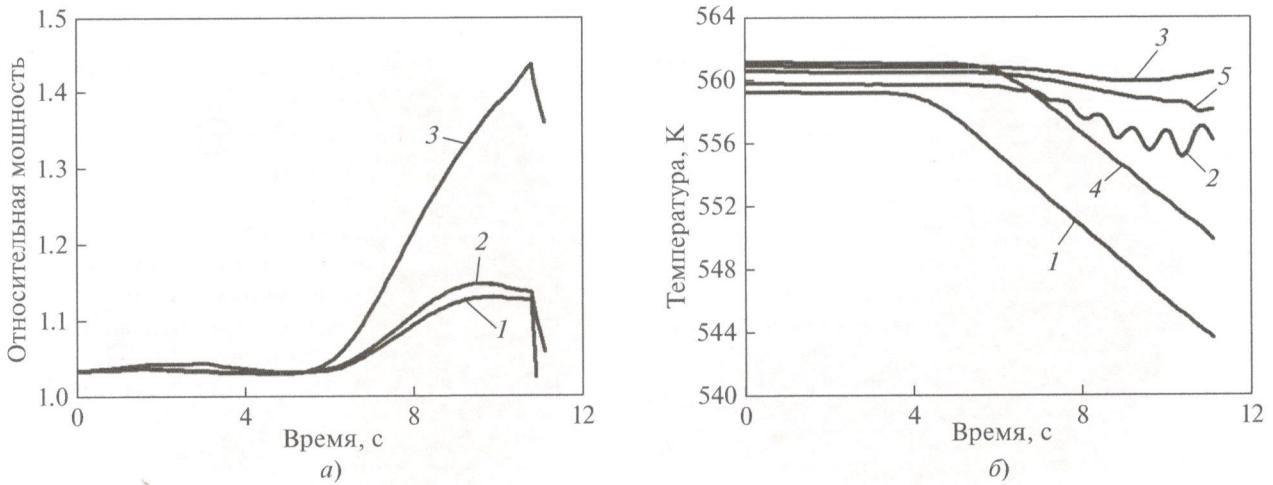


Рис. 8. Изменение во времени параметров в режиме 1.  
а — мощность: 1 — реактора; 2 — ТВС № 140; 3 — ТВС № 147; б — температура теплоносителя: 1 — на входе в напорную камеру из петли I; 2—5 на выходе в ТВС № 75, 140, 147, 160 соответственно

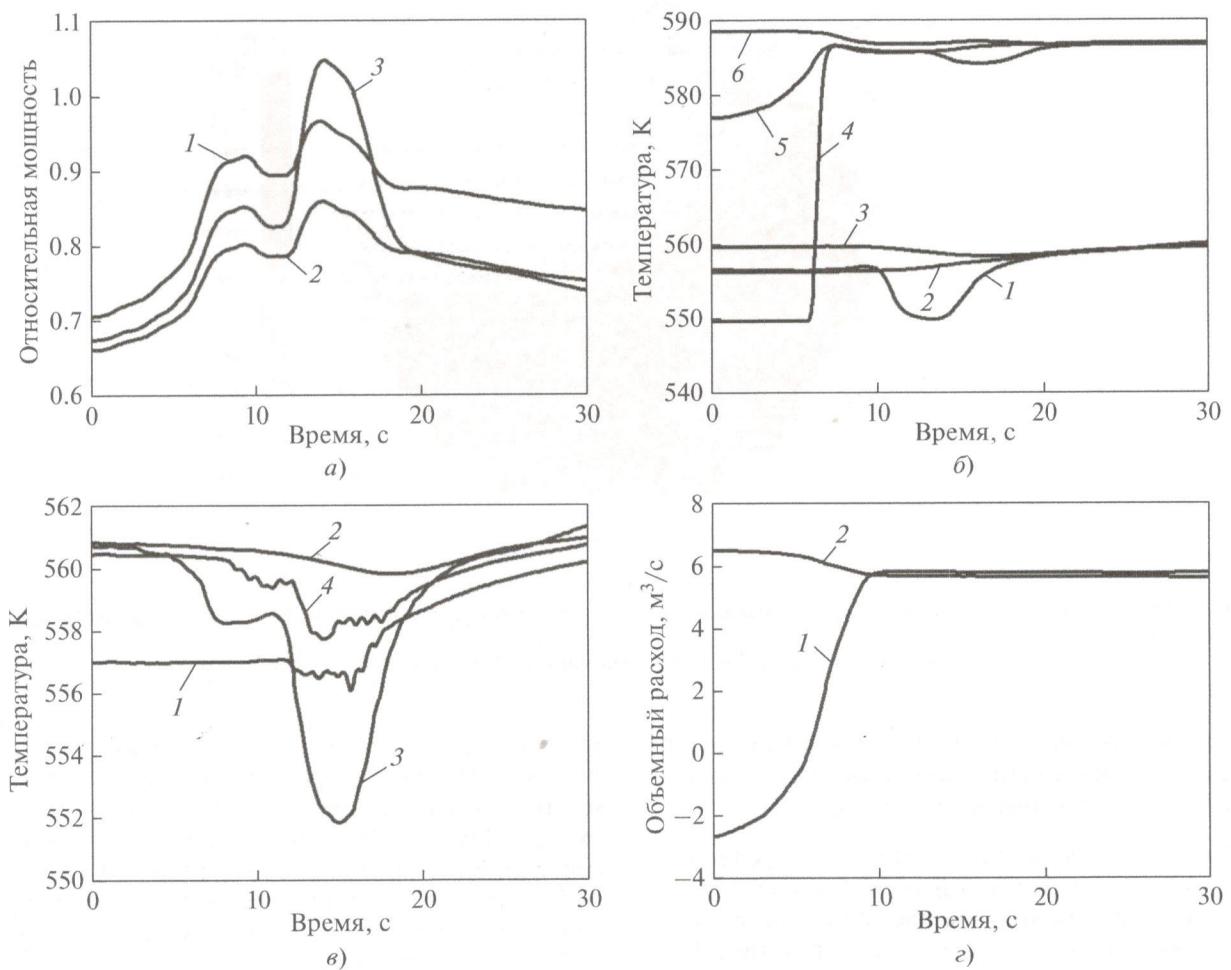


Рис. 9. Изменение во времени параметров в режиме 2.  
а — мощность: 1 — реактора; 2 — ТВС № 140; 3 — ТВС № 147; б — температура теплоносителя: 1—3 — на входе в напорную камеру из петель I, II, III; 4—6 — на выходе из сборной камеры в петли I, II, III соответственно; в — температура теплоносителя: 1—4 — на входе в ТВС № 75, 140, 147, 160 соответственно; г — объемный расход теплоносителя: 1—2 — петли I, III

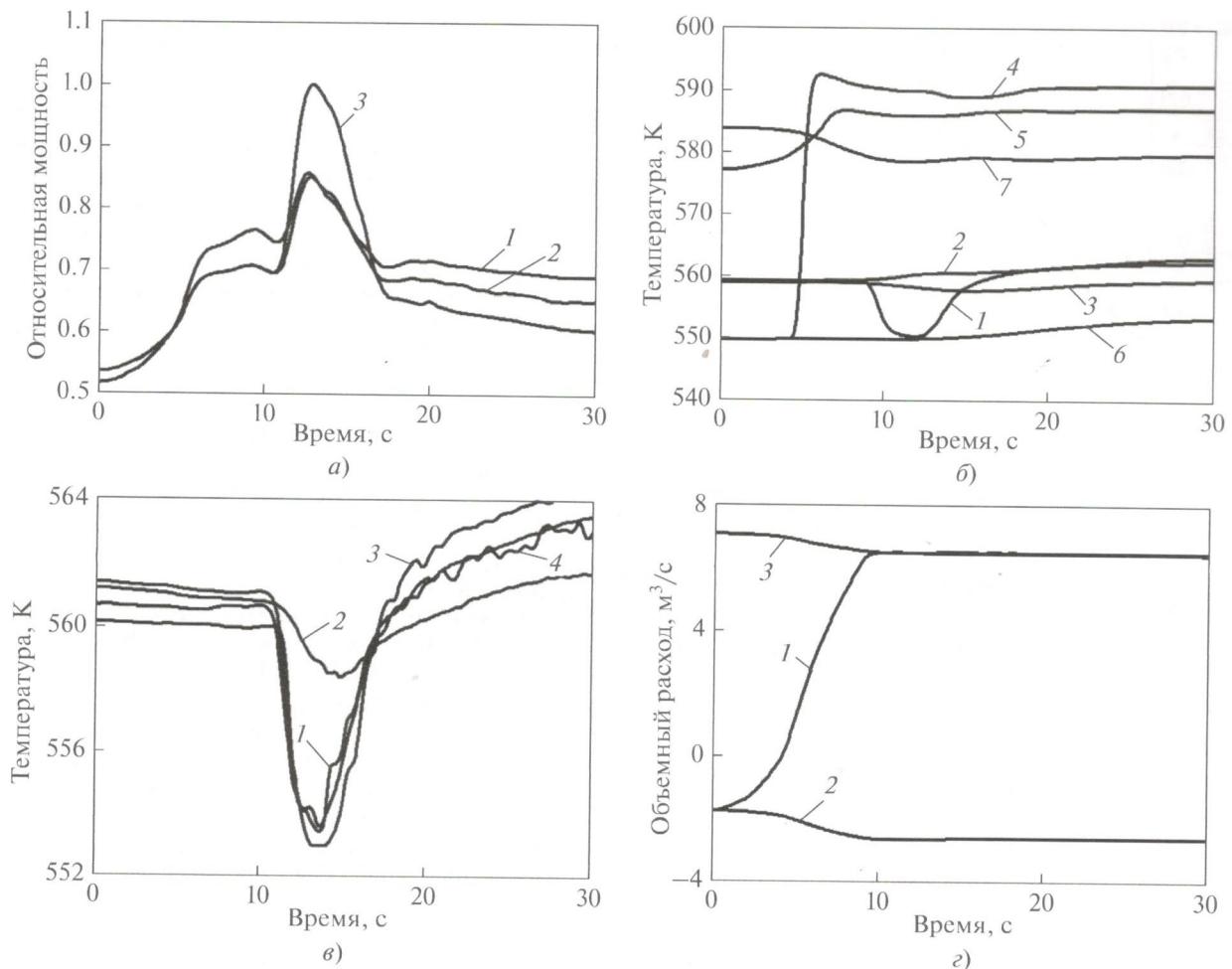


Рис. 10. Изменение во времени параметров в режиме 3.

*a* – мощность: 1 – реактора; 2 – ТВС № 140; 3 – ТВС № 147; *б* – температура теплоносителя: 1–3 – на входе в напорную камеру из петель I, II, IV; 4–6 – на выходе из сборной камеры в петли I, II, IV соответственно; *в* – температура теплоносителя: 1–4 – на входе в ТВС № 75, 140, 147, 159 соответственно; *г* – объемный расход теплоносителя: 1–3 – петли I, III, IV

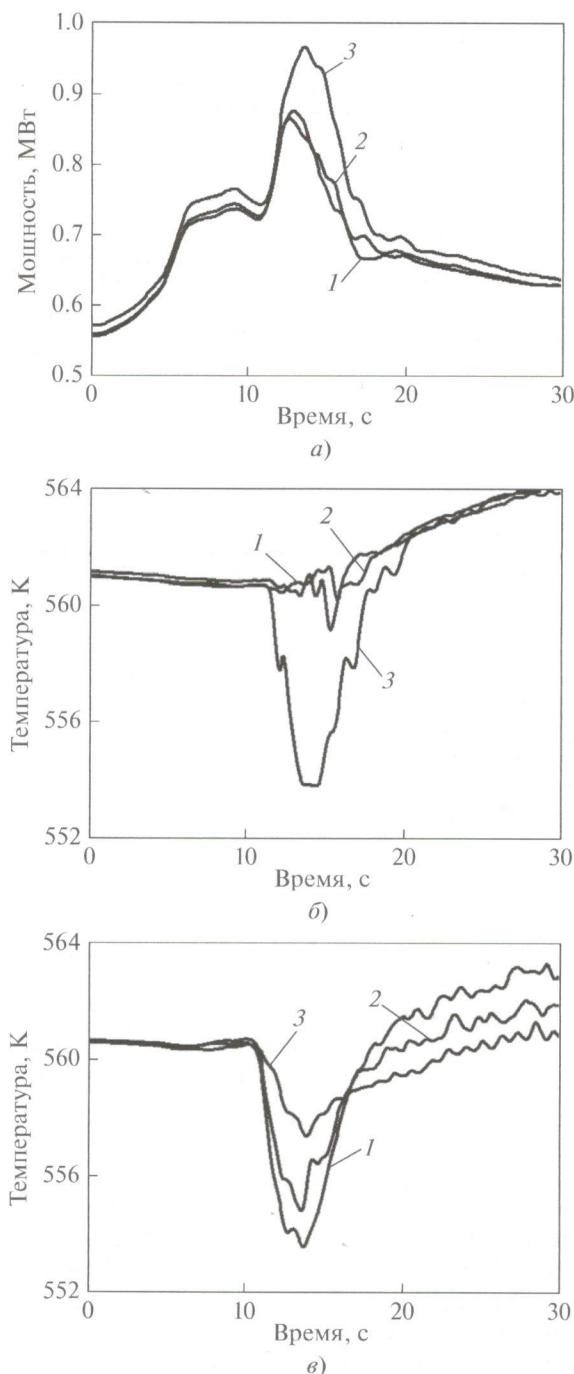
при включении насоса, вторая обусловлена провалом температуры жидкости на входе в напорную камеру из петли I из-за реверсирования потока. Можно отметить различие мощности энерговыделения ТВС № 140 и 147 уже в исходном состоянии и на первой стадии роста. Причиной различия являются процессы перемешивания в сборной камере, которые моделируются в гидравлическом приближении. На выходе из сборной камеры в патрубки петель, расположенные ближе к неработающим петлям, поступает более холодный теплоноситель (см. рис. 9, *б* и 10, *б*). Максимальные значения энерговыделения по ТВС № 140 и 147 в этих режимах различаются приблизительно в 1.2 раза. Графики эволюции температуры на входе в ТВС № 75 и 159 (рис. 10, *в*) демонстрируют расширение сектора холодной жидкости в режиме 3.

Для подтверждения сеточной сходимости для режима 3 были проведены два расчета на сетках с

укрупненной дискретизацией по всем координатным направлениям: в 1.4 раза (промежуточная сетка) и в 2 раза (грубая сетка). Подтверждение сеточной сходимости представлено на рис. 11. Из этого рисунка видно, что на грубой сетьке происходит перекос сектора с холодной жидкостью по часовой стрелке в сторону петли II. Однако на промежуточной сетке результаты расчетов практически совпадают с данными, полученными на исходной сетке.

## ВЫВОДЫ

1. Расчетами трех режимов с несимметричной работой оборудования петель теплообмена реакторной установки ВВЭР-1000 продемонстрирована работоспособность связки 1D-, 3D-теплогидравлических моделей и модели пространственной кинетики расчетного кода KORCAP/CFD. Сценарии выбранных режимов характеризуются умень-



**Рис. 11.** Сеточная сходимость результатов расчетов для режима 3.  
а – мощность ТВС № 48; б – температура теплоносителя на входе в ТВС № 48; в – температура теплоносителя на входе в ТВС № 159; 1 – исходная мелкая сетка; 2 – промежуточная сетка; 3 – грубая сетка

шением температуры теплоносителя на входе в напорную камеру из одной петли.

2. Анизотропное растекание потока жидкости из входных патрубков реактора по кольцевой области напорной камеры происходит в результате действия вращательной инерционной силы.

3. Подтверждена сходимость результатов расчетов при измельчении сетки в трехмерной области моделирования.

4. Данные расчетов по коду KORCAP/CFD режимов реакторных установок ВВЭР при несимметричной работе петель с трехмерной моделью напорной камеры можно использовать для настройки и кроссверификации квазитрехмерных в гидравлическом приближении 1D-моделей камеры, которые применяются при расчетном обосновании безопасности реакторной установки с ВВЭР.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Программный комплекс КОРСАР/ГП. Аттестац. паспорт программного средства № 263 от 23.09.2009 / Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору.
2. Юдов Ю.В. Двухжидкостная модель нестационарной контурной теплогидравлики и ее численная реализация в расчетном коде КОРСАР // Теплоэнергетика. 2002. № 11. С. 17–21.
3. Single-phase mixing studies by means of a directly coupled CFD/system-code tool / D. Bertolotto, A. Manera, S. Frey, H.-M. Prasser, R. Chawla // Ann. Nucl. Energy. 2009. V. 36. P. 310–316. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2008.11.027>
4. Aumiller D.L., Tomlinson E.T., Bauer R.C. A coupled RELAP5-3D/CFD methodology with a proof-of-principle calculation // Nucl. Eng. Des. 2001. V. 205. P. 83–90.
5. System-CFD coupled simulation of the Phenix reactor natural circulation test / R. Baviere, N. Tauveron, F. Perdu, E. Garre // Proc. 15th Intern. Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal-Hydraulics (NURETH-15). Pisa, Italy, 12–17 May 2013.
6. Development of a domain overlapping coupling methodology for STH/CFD analysis of heavy liquid metal thermal-hydraulics / M. Jeltsov, K. Koop, P. Kudinov, W. Villanueva // Proc. 15th Intern. Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal-Hydraulics (NURETH-15). Pisa, Italy, 12–17 May 2013.
7. Extension of the simulation capabilities of the 1D system code ATHLET by coupling with the 3D CFD software package ANSYS CFX / A. Papukchiev, G. Lerch1, C. Waata, T. Franck // Proc. 13th Intern. Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal-Hydraulics (NURETH-13). Kanazawa, Japan, 27 Sept.–2 Oct. 2009.
8. Юдов Ю.В., Чепилко С.С., Данилов И.Г. Численная реализация трехмерной модели теплогидравлики на основе метода вложенной границы в расчетном коде КОРСАР/CFD // ВАНТ. Сер. Математическое моделирование физических процессов. 2018. Вып. 4. С. 46–56. [Саров.]
9. Объединение одномерной и трехмерной моделей теплогидравлики в расчетном коде КОРСАР/CFD / Ю.В. Юдов, И.Г. Данилов, С.С. Чепилко, Д.С. Кацстериин // ВАНТ. Сер. Математическое моделирование физических процессов. 2019. Вып. 1. С. 57–68. [Саров.]

10. **Верификация** расчетного кода KORSAR/CFD по экспериментальным данным с перемешиванием бора на модели реактора ВВЭР-1000 / Ю.В. Юдов, С.Н. Румянцев, С.С. Чепилко, Д.С. Кацерин // Материалы 10-й Междунар. науч.-техн. конф. "Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР" (МНТК-10). Подольск, Россия, 16–19 мая 2017 г.
11. **Программное** средство САПФИР\_95&RC\_ВВЭР.2. Аттестац. паспорт программного средства № 321 от 18.04.2013 / Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору.
12. **Программное** средство САПФИР\_95.1. Аттестац. паспорт программного средства № 390 от 16.12.2015 / Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору.
13. Kim S., Chung B.-J. A scale analysis of the turbulent mixing rate for various Prandtl number flow fields in rod bundles // Proc. 9th Intern. Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal-Hydraulics (NURETH-9). San Francisco, USA, 3–8 Oct. 1999.
14. Experimental investigation of in-vessel mixing phenomena in a VVER-1000 scaled test facility during unsteady asymmetric transients / A. Bucalossi, F. Moretti, D. Melideo, D. Gallori // Nucl. Eng. Des. 2011. V. 241. P. 3068–3075.  
<https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2011.05.005>

## Three-Dimensional Simulation of a VVER-1000 Reactor's Pressure Chamber in the Modes with Asymmetrical Loop Operation Using a KORSAR/CFD Computation Code

**Yu. V. Yudov<sup>a,\*</sup>, I. G. Petkevich<sup>b</sup>, V. G. Artemov<sup>a</sup>, D. S. Kasterin<sup>b</sup>, and S. N. Rumyantsev<sup>a</sup>**

<sup>a</sup>Aleksandrov Scientific Research Institute of Technology, Sosnovy Bor, Leningrad oblast, 188540 Russia

<sup>b</sup>OKB Gidropress, Podolsk, Moscow oblast, 142103 Russia

\*e-mail: yudov@niti.ru

Received March 13, 2019; revised April 8, 2019; accepted May 29, 2019

**Abstract--**The KORSAR/CFD code results from the development of the KORSAR/GP system code certified in 2009 by the Rostekhnadzor (Federal Service for Ecological, Technological, and Nuclear Supervision) as applied to the calculated justification of the safety for VVER reactors. One of the important aspects of development consists in the introduction of the CFD-module code into functional content for the simulation of spatial turbulent flows in the mixing chambers of reactors using a nested boundary method in the RANS-approximation. The CFD module is combined with a one-dimensional model according to a semi-implicit scheme as a standard code element. Calculation results using the KORSAR/CFD code are presented for the following three modes with the asymmetrical operation of a VVER-1000 reactor's flow-circuit loops. They consist in breaking the steam pipeline in the steam generator, in connecting the main circulation pump while initially operating three pumps at the reactor power of 71% with respect to the nominal one, and in connecting a pump while initially operating two opposite pumps at the reactor power of 52% with respect to the nominal one. The calculations have been carried out based on the input data file for the NPP power unit with a VVER-1000 developed by the specialists in VVER design at OKB Gidropress, the Chief Designer in the field of VVER reactor units. A three-dimensional simulation of coupled neutron-physical and thermohydraulic processes in the reactor core has been performed. A thermohydraulic model of the reactor core has been used in a channel-by-channel approximation and a program block for the calculation of three-dimensional neutron kinetics. In the problems under consideration, the three-dimensional simulation domain for the CFD module includes four inlet manifolds and a part of the reactor pressure chamber before entering the holes in the elliptical bottom of the shaft. The holes in the elliptical bottom and the area beyond the shaft up to the inlet manifolds have been represented by the elements of a one-dimensional model. Based on the results of the calculations, the heat-carrier flow pattern in the reactor pressure chamber has been analyzed. A flow pattern effect exerted on the dynamics of the liquid temperature distribution at the entry into the fuel assemblies of the core and on the energy release power of the fuel assemblies in the simulated modes has been demonstrated.

**Keywords:** VVER-1000 reactor plant, pressure chamber, core, thermohydraulic system, computation code, three-dimensional model, turbulence