

КРОССВЕРИФИКАЦИЯ 1D- И 3D-МОДЕЛЕЙ НАПОРНОЙ КАМЕРЫ РЕАКТОРА ВВЭР-1000 РАСЧЕТНОГО КОДА КОРСАР/CFD ПО РЕЖИМАМ С НЕСИММЕТРИЧНОЙ РАБОТОЙ ПЕТЕЛЬ

© 2019 г. Ю. В. Юдов^a, *, И. Г. Петкевич^b, В. Г. Артемов^a

^aНаучно-исследовательский технологический институт им. А.П. Александрова,
Копорское шоссе, д. 72, Ленинградская обл., г. Сосновый Бор, 188540 Россия

^bОКБ “Гидропресс”, ул. Орджоникидзе, д. 21, Московская обл., г. Подольск, 142103 Россия

*e-mail: yudov@niti.ru

Поступила в редакцию 13.03.2019 г.

После доработки 07.05.2019 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 с 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. При этом CFD-модуль объединен с одномерной моделью по полунеявной схеме как типовой элемент кода. На основе расчетов трех режимов с несимметричной работой оборудования петель теплообмена реакторной установки с ВВЭР-1000 проведена кроссверификация трехмерной в CFD-приближении и квазитрехмерной многоканальной моделей расчетного кода KORSCAP/CFD для напорной камеры реактора. В качестве режимов выбраны: разрыв паропровода одного 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. Сценарий выбранных режимов характеризуется уменьшением температуры теплоносителя на входе в напорную камеру из одной петли, что приводит к асимметричному по тепловыделяющим сборкам повышению мощности реактора вследствие отрицательного эффекта реактивности. Показано, что благодаря искусственно увеличению сопротивления опускному движению теплоносителя по каналам, представляющим напорную камеру в многоканальной расчетной схеме, удается воспроизвести пространственную картину течения в камере, полученную при использовании трехмерной модели камеры, и ее влияние на процессы изменения температуры при перемешивании теплоносителя. Следствием является хорошее согласование результатов расчетов с использованием этой схемы с данными, полученными при трехмерном моделировании напорной камеры в CFD-приближении во всех рассматриваемых режимах. Продемонстрирована чувствительность результатов расчетов к изменению расчетной схемы при применении квазитрехмерной многоканальной модели камеры реактора.

Ключевые слова: реакторная установка, теплогидравлика, одномерная модель, трехмерная модель, кроссверификация

DOI: 10.1134/S0040363619120117

В настоящее время при расчетном анализе безопасности аварийных режимов реакторных установок (РУ) с ВВЭР с несимметричной работой петель по одномерным (1D) теплогидравлическим кодам используются квазитрехмерные, многоканальные расчетные схемы напорной камеры с установлением между ячейками каналов поперечных гидравлических связей. Такие схемы позволяют учитывать изменение температуры или концентрации борной кислоты при перемешивании потока в объеме напорной камеры. Процессы перемешива-

ния определяют динамику и распределение перечисленных параметров на входе в активную зону и вследствие изменения реактивности оказывают влияние на деформацию поля энерговыделения в тепловыделяющих сборках (ТВС). Настройка и обоснование многоканальных расчетных схем осуществляются на базе экспериментальных данных, полученных на стендовых моделях реакторных установок и на натурных объектах при проведении пусконаладочных испытаний. Стендовые установки являются дорогостоящими маломас-

штабными моделями РУ, эксперименты на них проводятся в граничной постановке, т.е. моделируется не весь контур, а только сам реактор. При пусконаладочных испытаниях действующих энергоблоков АЭС проводятся измерения только в переходных режимах с незначительными возмущениями, причем количество измеряемых параметров в этих опытах ограничено. Поэтому полагается перспективным использовать дополнительно результаты расчетов аварийных режимов РУ ВВЭР по одномерным системным кодам с моделированием напорной камеры в трехмерном CFD-приближении для настройки и верификации квазитрехмерных расчетных схем камеры.

В качестве одного из инструментов для расчетного обоснования безопасности ВВЭР применяется расчетный код KORSCAP/CFD, который является развитием кода KORSCAP/GP, аттестованного в 2009 г. в Ростехнадзоре [1]. Важный аспект развития заключается во внедрении в функциональное наполнение кода трехмерного (3D) CFD-модуля для моделирования пространственных турбулентных течений в смесительных камерах реакторов [2]. Этот CFD-модуль объединен с одномерной моделью по полуяевной численной схеме как типовой элемент кода [3].

В [4] продемонстрирована работоспособность связки 1D-, 3D-теплогидравлических моделей и модели пространственной кинетики расчетного кода KORSCAP/CFD на примере расчетов трех режимов с несимметричной работой оборудования петель РУ ВВЭР-1000. В качестве таких режимов выбраны:

разрыв паропровода одного парогенератора (ПГ) (режим 1);

подключение главного циркуляционного насоса (ГЦН) при исходной работе трех ГЦН на мощности реактора 71% номинальной (режим 2);

подключение ГЦН при исходной работе двух противоположных ГЦН на мощности 52% номинальной (режим 3).

Сценарии выбранных режимов характеризуются уменьшением температуры теплоносителя на входе в напорную камеру из одной петли. На основе результатов расчетов проведен анализ картины течения теплоносителя в напорной камере реактора при работе четырех, трех и двух циркуляционных насосов. Показано влияние течения теплоносителя на динамику распределения температуры жидкости на входе в ТВС и мощности энерговыделения по ТВС в моделируемых режимах.

В данной статье для перечисленных режимов приведены результаты кросс-верификации 3D- и многоканальной 1D-моделей напорной камеры реактора расчетного кода KORSCAP/CFD. Следует отметить, что описание моделируемых режимов и методика проведения их расчетов

представлены в работе [4]. Пространственные нейтронно-физические процессы моделируются с использованием программного блока КАРТА кода KORSCAP/GP, исходные данные для которого формируются комплексом программ САПФИР_95&RC_BBEP, аттестованным в Ростехнадзоре [5, 6].

МНОГОКАНАЛЬНАЯ РАСЧЕТНАЯ СХЕМА НАПОРНОЙ КАМЕРЫ

Расчетная модель реакторной установки с ВВЭР-1000 базируется на файле входных данных для кода KORSCAP/GP специалистов ОКБ “Гидропресс” (главного конструктора РУ с ВВЭР) применительно к энергоблоку № 1 Ростовской АЭС в конце третьей топливной кампании. Модель использовалась при расчете режимов реакторной установки с реализацией пространственных эффектов в напорной камере реактора в трехмерном CFD-приближении и изложена в [4]. Поэтому далее более подробно рассматривается только квазитрехмерная многоканальная расчетная схема напорной камеры.

Кольцевая область напорной камеры реактора в расчетной схеме представлена 42 одинаковыми каналами (обозначены ch), которые разбиты на шесть ячеек. Нумерация и расположение каналов относительно ТВС и входных патрубков приведены на рис. 1. На этом рисунке арабскими цифрами обозначены номера ТВС. Выход каждого из четырех каналов, моделирующих холодные нитки петель, связан со входами трех соответствующих каналов кольцевой области. Остальные каналы области представляют собой секторы между патрубками: по три канала – два малых сектора между петлями I, II и III, IV; по двенадцать каналов – два больших сектора между петлями II, III и I, IV. На входе эти каналы имеют непроницаемые соединения. Выходы каналов напорной камеры присоединены ко входу каналов периферийных ТВС (данные связи иллюстрируются рис. 1).

На рис. 2 показаны связи по входу и выходу каналов двух типов кольцевой области напорной камеры. Каждая из шести расчетных ячеек каналов напорной камеры имеет две поперечные гидравлические связи с соответствующими ячейками соседних по окружности каналов.

Расчеты проведены для двух вариантов моделирования напорной камеры. В исходном (первом) варианте файла входных данных поставлены одинаковые гидравлические сопротивления в каждом соединении каналов кольцевой области. Объем застойного пространства напорной камеры над патрубками включен в объемы первых расчетных ячеек каналов путем увеличения площади их проходного сечения. В модифицированном (втором) варианте местные гидравлические

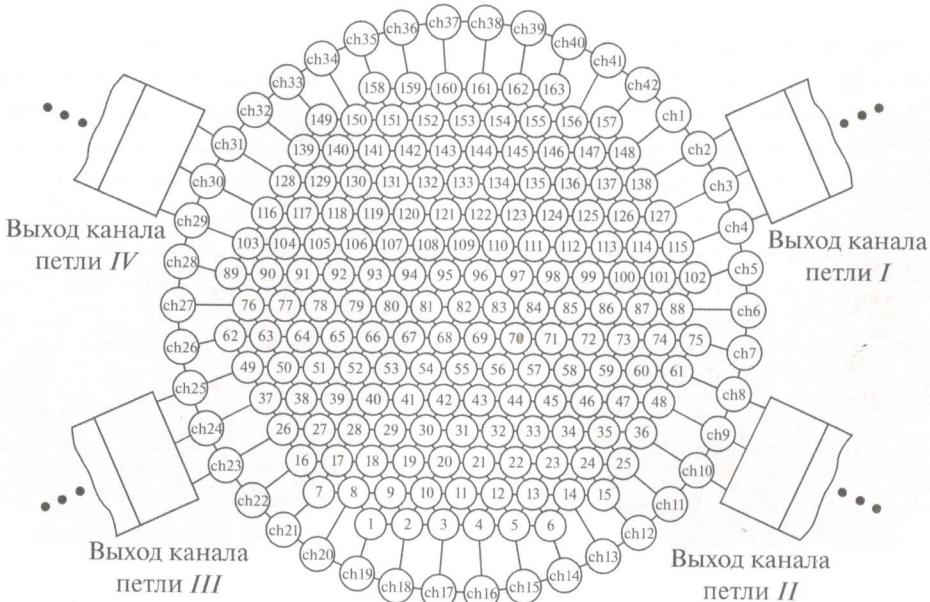


Рис. 1. Нумерация и расположение каналов в кольцевой области

сопротивления перенесены в последнее соединение на выходе из каналов. Объем застойного пространства учтен в объемах первых ячеек каналов посредством увеличения их длины. Принципи-

альное различие двух вариантов заключается в том, что в первом варианте искусственно затруднено протекание теплоносителя вниз к отверстиям в эллиптическом днище шахты вследствие гидравлических сопротивлений и ускорения при сужении прохода. Данный факт способствует растеканию потоков, поступающих из патрубков, через попеченные гидравлические связи по окружности напорной камеры. Поперечные потоки сталкиваются и образуется несколько зон с направленными к активной зоне потоками теплоносителя (количество зон равно количеству функционирующих ГЧН).

Представленная картина течения жидкости подтверждена расчетами с моделированием напорной камеры с помощью CFD-модуля [4]. В этой работе показано, что причиной образования областей стагнации потока под патрубками работающих петель и растекания теплоносителя по окружности кольцевой области является действие инерционной силы вращательного ускорения, которую невозможно учесть в 1D-моделях. Расчет двух вариантов квазитрехмерного 1D-моделирования напорной камеры позволяет определить чувствительность результатов вычислений к незначительному изменению расчетной схемы.

Рис. 2. Связи по входу и выходу каналов двух типов кольцевой области.
а – продолжение канала петли; б – сектор

СОПОСТАВЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ РАСЧЕТОВ

На рис. 3 представлены картограммы расчетного распределения температуры теплоносителя на входе в ТВС (в первой ячейке шестигранных каналов области активной зоны) для режима 3 в момент максимальной неравномерности поля температуры при 3D-моделировании напорной камеры и

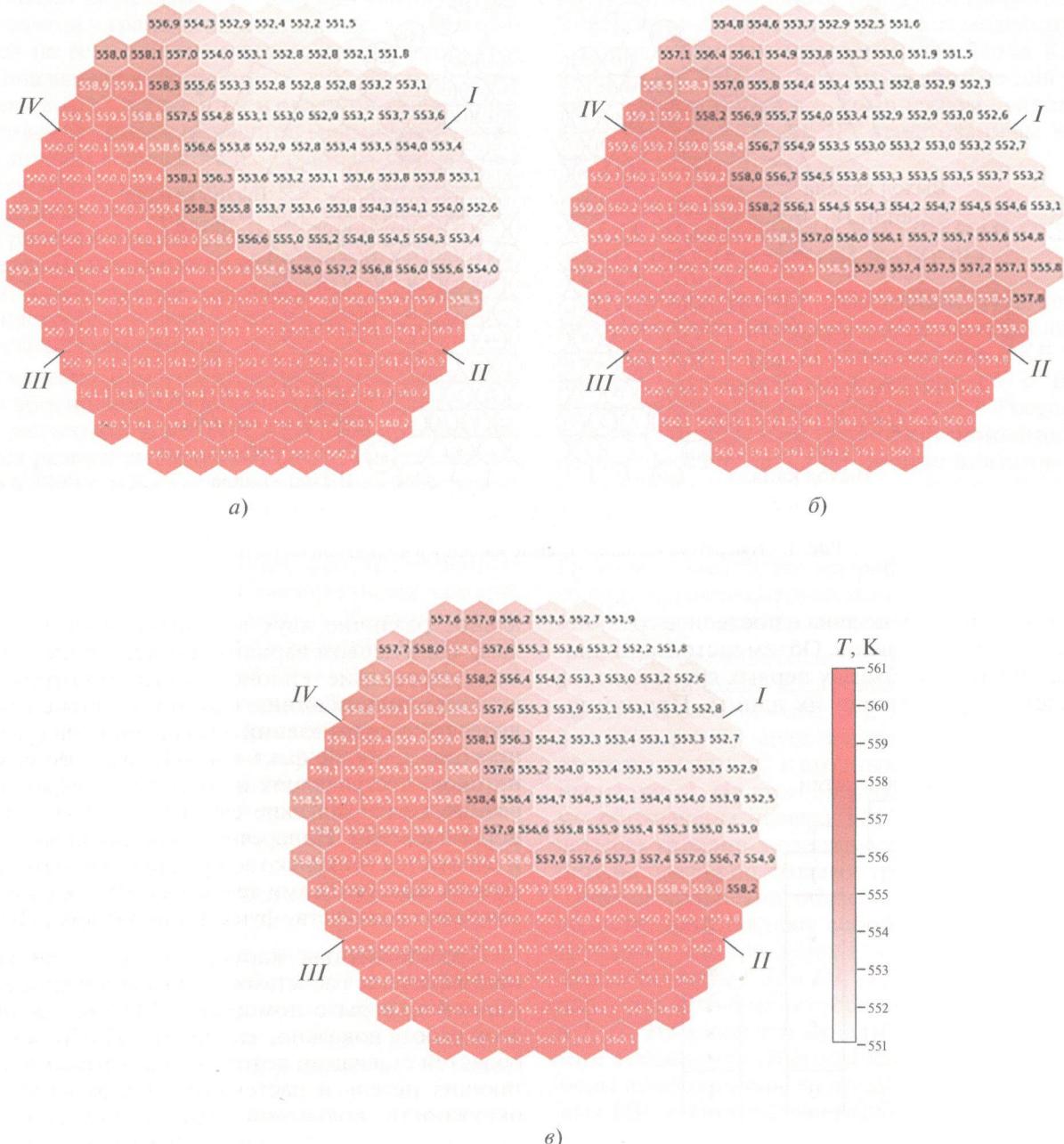


Рис. 3. Распределение температуры на входе в активную зону в режиме 3 в момент максимальной неравномерности поля температуры.

Модели напорной камеры: *a* – 3D; *б* – 1D (первый вариант); *в* – 1D (второй вариант)

два вариантах квазитрехмерного 1D-моделирования камеры.

На этом рисунке римскими цифрами пронумерованы петли. Возмущения во всех режимах задавались по петле *I*. Видно, что углы секторов холодного теплоносителя для первого варианта 1D- и 3D-моделей камеры совпадают и составляют около 120°. Для второго варианта 1D-модели секторужен между патрубками петель *I*, *IV* в сто-

рону работающей петли и угол его равен 90°. Различия двух вариантов расчетов по 1D-модели для данного режима на качественном уровне обусловлены несимметричной картиной течения жидкости, поскольку к моменту проникновения “языка” холодного теплоносителя в активную зону работают только три ГЦН, невключенным остается ГЦН петли *III*. В остальных режимах реализуется симметричная картина течения, и во всех трех расчетах сектор холодной жидкости со-

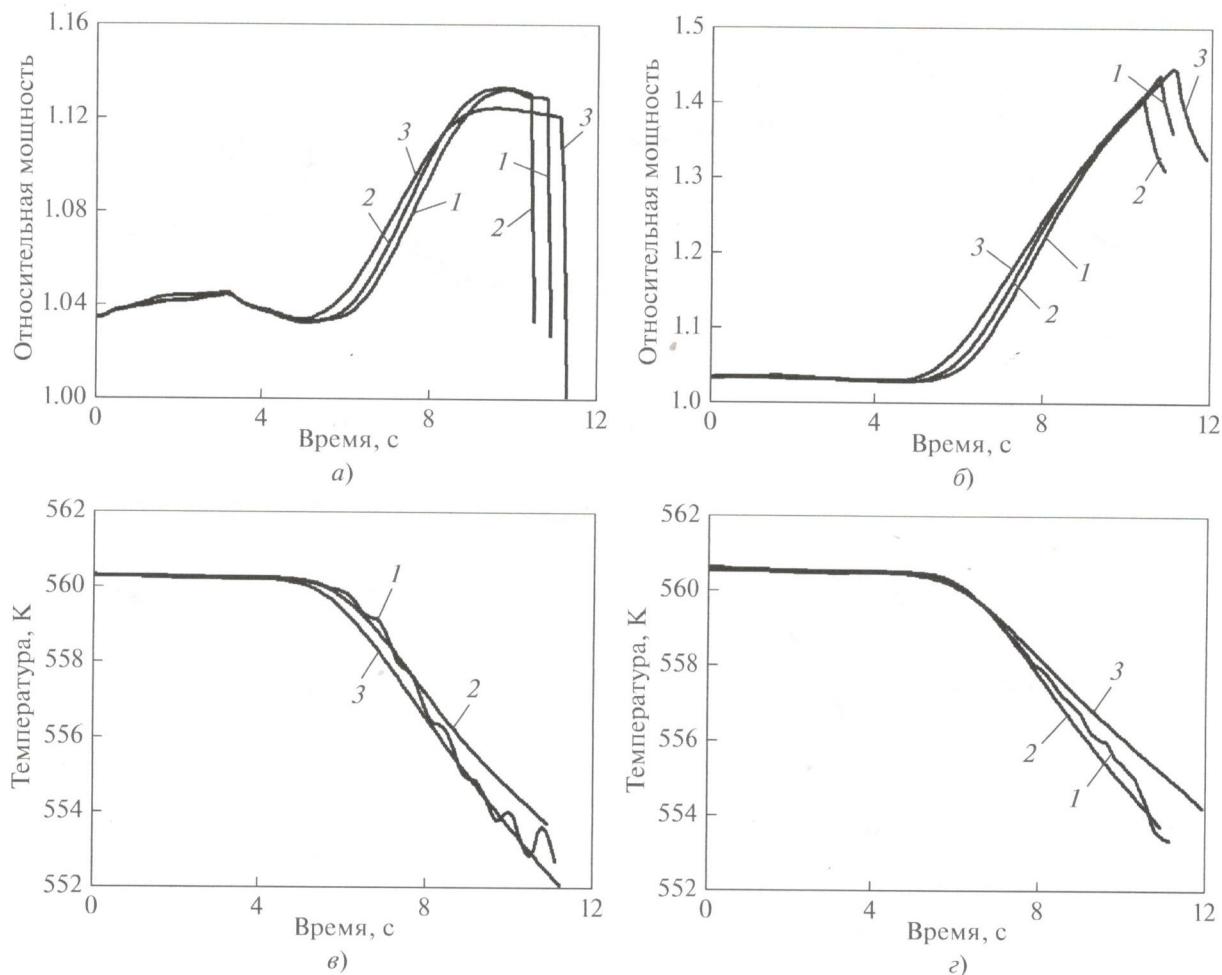


Рис. 4. Изменение во времени расчетных параметров в режиме 1.

а – мощность реактора; *б* – мощность ТВС № 147; *в* – температура на входе в ТВС № 88; *г* – температура на входе в ТВС № 161.

Модели напорной камеры: 1 – 3D; 2 – 1D (первый вариант); 3 – 1D (второй вариант)

ставляет 90° и расположен симметрично между патрубками петель I, II и I, IV (см. [4]). Результаты расчетов различаются только количественно.

На рис. 4–6 для сопоставления приведены результаты расчетов в рассматриваемых режимах по динамике отдельных параметров: относительной мощности реактора, мощности теплоизолированной ТВС № 147 в третьей ячейке области активной зоны с максимальным энерговыделением (данная ТВС находится внутри сектора проникновения холодного теплоносителя) и температуры теплоносителя на входе в ТВС вблизи границ холодных секторов. Мощности энерговыделения на рисунках нормированы на их значения при номинальной работе реакторной установки.

В режиме 1 наблюдаются незначительные различия в расчетных данных по темпам изменения температуры теплоносителя по ТВС холодного сектора, что проявляется в некотором разбросе интегральной мощности энерговыделения реак-

тора и в отдельных ТВС. Как следствие, аварийная защита в расчетах срабатывает в различные моменты времени (разница составляет не более 0.7 с). Максимальные значения мощности в теплоизолированной ТВС № 147 различаются в двух вариантах расчетов с 1D-моделью напорной камеры на 9% ее приращения в режиме 1. При этом данные по времени срабатывания аварийной защиты и максимальной мощности, полученные с помощью 3D-модели камеры, находятся в интервале разброса результатов расчетов по 1D-модели.

В режиме 2 количественные различия результатов увеличиваются. Вследствие более медленного роста расхода теплоносителя через активную зону при включении насоса при использовании второго варианта 1D-модели камеры значительно уменьшается подъем мощности на первой стадии режима 2 – 10-й секунды. Более медленный рост расхода обусловлен затрудненным растеканием поступающего в кольцевую область камеры пото-

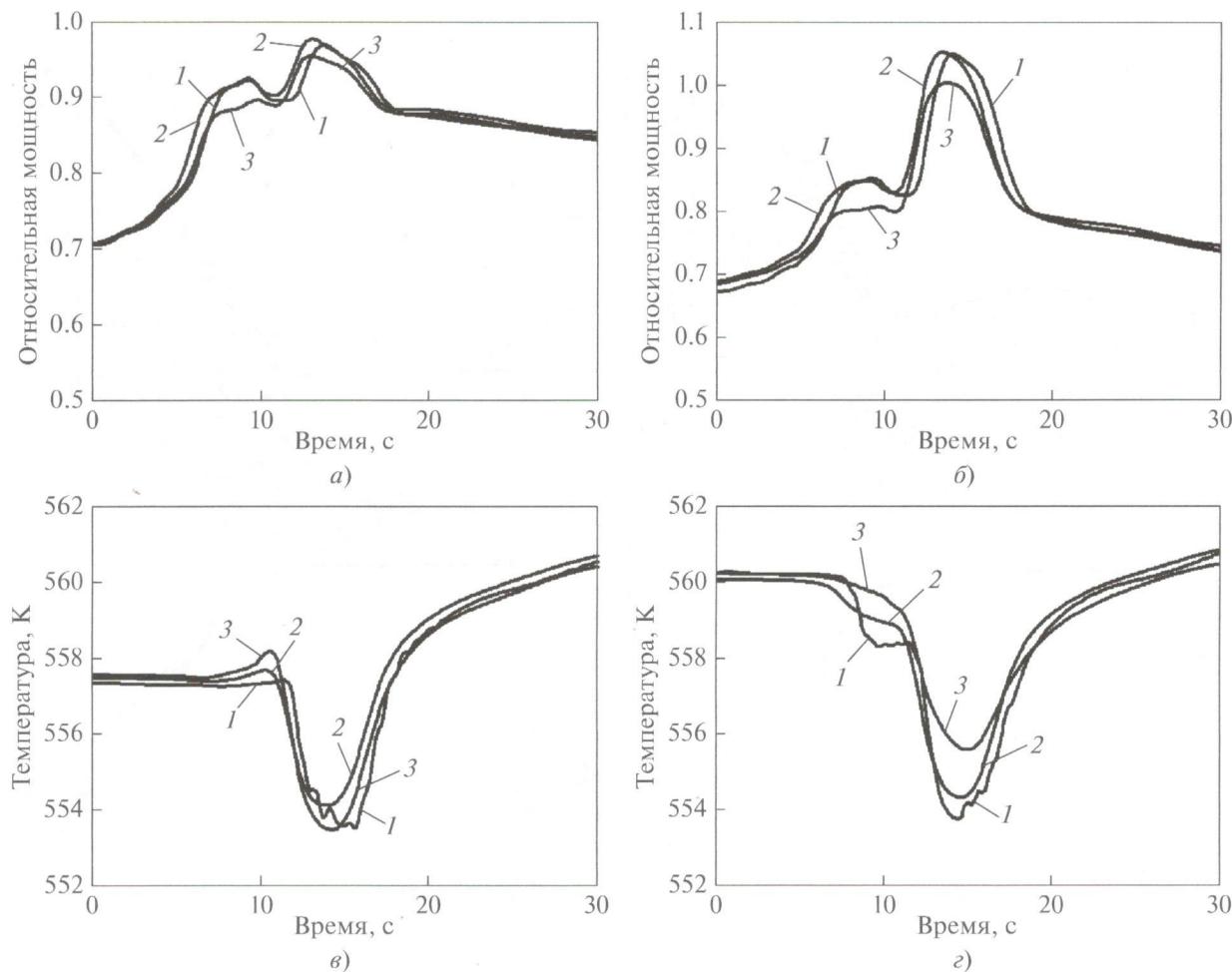


Рис. 5. Изменение во времени расчетных параметров в режиме 2.
Обозначения см. рис. 4

ка жидкости, что приводит к увеличению гидравлического сопротивления при опускном движении к активной зоне и повышению инерционности данного процесса (аналогичная картина наблюдается в режиме 3 с включением третьего насоса). На второй стадии из-за менее интенсивного захолаживания активной зоны в момент поступления на вход холодного фронта теплоносителя пик подъема мощности в теплонапряженной ТВС № 147 при реализации этого варианта расчетной схемы меньше на 13.1% ее общего роста в режиме, чем в расчете с использованием 3D-модели напорной камеры. Результаты расчета по исходному варианту 1D-модели хорошо согласуются с результатами расчета при трехмерном моделировании камеры в CFD-приближении.

Сужение расчетного сектора проникновения холодного теплоносителя в активную зону при использовании второго варианта 1D-модели напорной камеры в режиме 3 приводит к снижению на 16.7% прироста мощности в теплонапряжен-

ной ТВС и уменьшению подъема мощности реактора на 11.1% по сравнению с изменением мощности с 3D-моделью напорной камеры. Результаты расчета по исходному (первому) варианту 1D-расчетной схемы отличаются в меньшую сторону не так значительно от результатов с 3D-моделью напорной камеры: на 4.0 и 4.4% по подъему мощности теплонапряженной ТВС и реактора соответственно.

В заключение этого раздела следует отметить, что благодаря искусственному увеличению сопротивления опускному движению теплоносителя по каналам, моделирующим напорную камеру, в исходном варианте многоканальной расчетной схемы, разработанной специалистами ОКБ “Гидропресс”, удалось воспроизвести пространственную картину течения в камере. Следствием этого явилось хорошее согласование результатов расчетов с использованием схемы с данными, полученными при трехмерном моделировании напорной

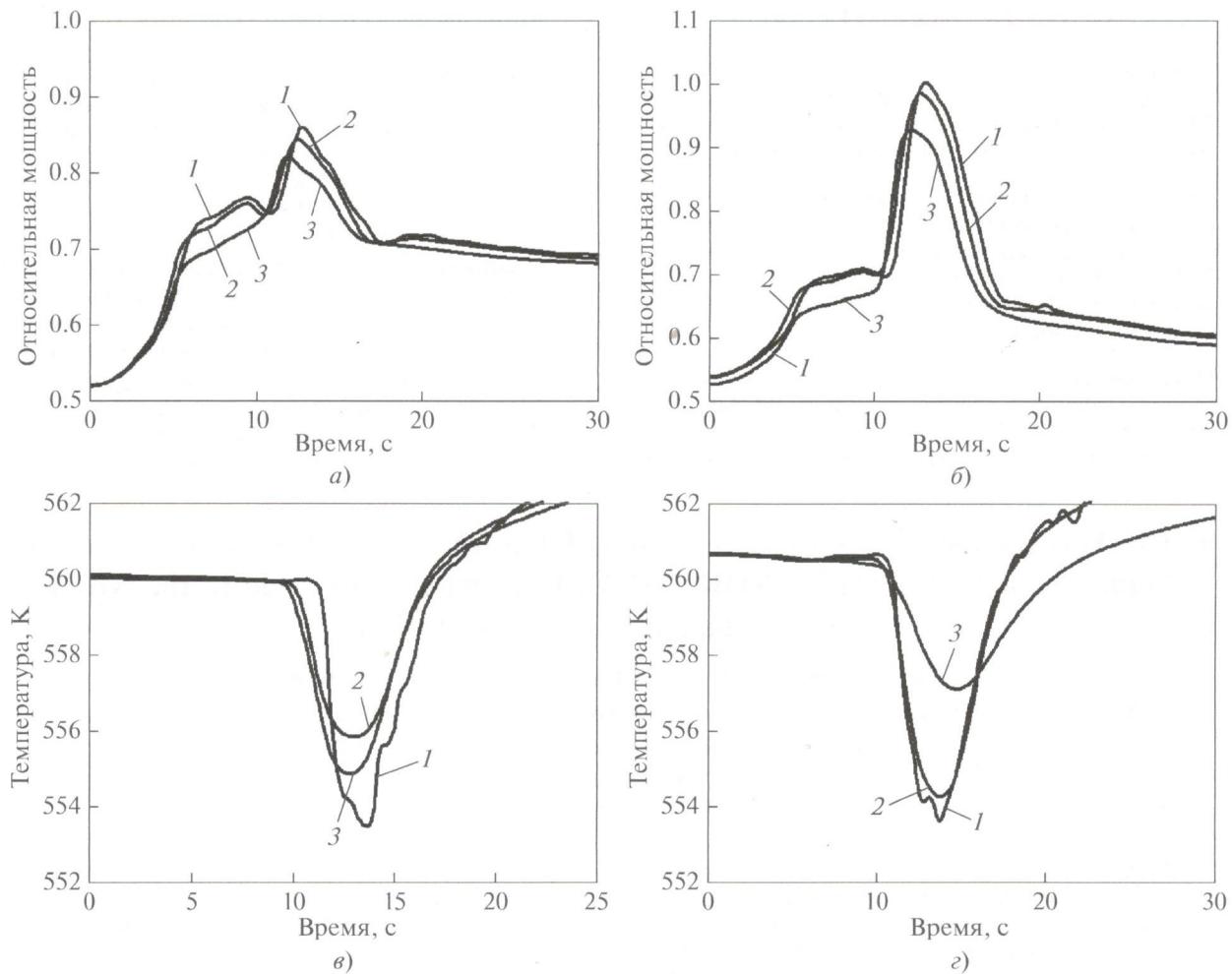


Рис. 6. Изменение во времени расчетных параметров в режиме 3.
 a – мощность реактора; b – мощность ТВС № 147; c – температура на входе в ТВС № 75; d – температура на входе в ТВС № 159.
Остальные обозначения см. рис. 4

камеры в CFD-приближении во всех рассматриваемых режимах РУ ВВЭР-1000.

ВЫВОДЫ

1. На основе расчетов трех режимов с несимметричной работой оборудования петель теплообмена с использованием файла входных данных реакторной установки с ВВЭР-1000 специалистами отдела главного конструктора РУ ВВЭР ОКБ “Гидропресс” проведена кроссверификация трехмерной в CFD-приближении и квазитрехмерной 1D-моделей расчетного кода KORCAP/CFD для напорной камеры.

2. Результаты расчетов при использовании исходного варианта квазитрехмерной 1D-модели и 3D-модели напорной камеры хорошо согласуются между собой.

3. Результаты расчетов весьма чувствительны к изменению расчетной схемы при применении квазитрехмерной многоканальной модели камеры реактора. Максимальные различия наблюдаются в режиме с подключением ГЧН к двум работающим. В рассматриваемых режимах углы сектора поступления холодного теплоносителя в активную зону различаются на 30°, а увеличение мощности в теплонапряженной ТВС – на 12%.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Программный комплекс KORSCAP/GP. Аттестац. паспорт программного средства № 263 от 23.09.2009 / Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору.
2. Юдов Ю.В., Чепилко С.С., Данилов И.Г. Численная реализация трехмерной модели теплогидравлики на основе метода вложенной границы в расчетном коде KORSCAP/CFD // ВАНТ. Сер. Математическое моделирование физических процессов. 2018. Вып. 4. С. 46–56. [Саров.]
3. Объединение одномерной и трехмерной моделей теплогидравлики в расчетном коде KORSCAP/CFD / Ю.В. Юдов, И.Г. Данилов, С.С. Чепилко, Д.С. Кацерин // ВАНТ. Сер. Математическое моделирование физических процессов. 2019. Вып. 1. С. 57–68. [Саров.]
4. Трехмерное моделирование напорной камеры реактора ВВЭР-1000 в режимах с несимметричной работой петель с помощью расчетного кода KORSCAP/CFD / Ю.В. Юдов, И.Г. Петкевич, В.Г. Артемов, Д.С. Кацерин, С.Н. Румянцев // Теплоэнергетика. 2019. № 11. С. 91–101. doi 10.1134/S0040363619110109
5. Программное средство САПФИР_95&RC_ВВЭР.2. Аттестац. паспорт программного средства № 321 от 18.04.2013 / Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору.
6. Программное средство САПФИР_95.1. Аттестац. паспорт программного средства № 390 от 16.12.2015 / Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору.

Cross-Verification of 1D and 3D Models for a VVER-1000 Reactor's Pressure Chamber Simulated by the KORSAR/CFD Computation Code in the Modes with Asymmetric Loop Operation

Yu. V. Yudov^{a,*}, I. G. Petkevich^b, and V. G. Artemov^a

^aAleksandrov Scientific Research Institute of Technology, Sosnovy Bor, Leningrad oblast, 188540 Russia

^bGidropress, Podolsk, Moscow oblast, 142103 Russia

*e-mail: yudov@niti.ru

Received March 13, 2019; revised May 7, 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 the 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 1D model according to a semi-implicit scheme as a standard code element. Based on the calculations performed for three modes with an asymmetrical equipment operation in the heat-transfer loops of the VVER-1000 reactor, cross-verification has been performed for a 3D model in the CFD approximation, and a quasi-3D-multichannel model of the KORSAR/CFD computation code for the reactor pressure chamber. For cross-verification, the following modes have been chosen: breaking steam pipeline in a steam generator, connecting the main circulation pump while initially operating three pumps at the reactor power of 71% with respect to the nominal value, connecting a pump while initially operating two opposite pumps at the reactor power of 52% with respect to the nominal value. The scenario of the chosen modes is characterized by a decrease in the heat-carrier temperature at the entry into the pressure chamber from a single loop, which leads to an asymmetric increase in the reactor power with respect to the fuel assemblies owing to a negative reactivity effect. It is shown that, because of the artificial increase in the resistance to the downward heat-carrier flow along the channels that represent a pressure chamber in the multichannel calculation scheme, the reproduction of a spatial in-chamber flow pattern obtained using the 3D model of the chamber and its effect exerted on temperature change in the course of the heat-carrier stirring have been gained. The results of calculation using this scheme are in good agreement with data obtained by means of the 3D simulation of the pressure chamber in the CFD approximation in all the considered modes. A sensitivity of the calculation results with respect to changes in the calculation scheme under using the quasi-3D multichannel model of the reactor chamber is demonstrated.

Keywords: reactor unit, thermohydraulics, 1D model, 3D model, cross-verification