

# РАЗРАБОТКА И ВЕРИФИКАЦИЯ НОДАЛИЗАЦИОННОЙ СХЕМЫ РЕАКТОРА ВВЭР-1000 В ПРОГРАММНОМ КОМПЛЕКСЕ КОРСАР/ГП НА ОСНОВЕ МЕЖДУНАРОДНЫХ ТЕСТОВЫХ ЗАДАЧ

*И. Г. Петкевич, Г. В. Алёхин*

ОАО ОКБ «ГИДРОПРЕСС», г. Подольск Московской обл.

## Введение

Для современных задач проектирования и обоснования безопасности реакторных установок (РУ) требуются многочисленные сложные расчеты. Для их реализации созданы и разрабатываются программные коды. Каждый из них имеет допустимый диапазон применения. Следуя правилам ядерной безопасности [1], программные средства, используемые при обосновании безопасности РУ необходимо аттестовать, то есть в принятом порядке подтвердить в надзорных органах возможность их применения в указанной области расчетов. Аттестация проводится в специально созданном для этого Совете по аттестации при «Научно-техническом центре по ядерной и радиационной безопасности», включающем секцию № 2: «Расчеты теплопередачи и гидродинамики, связанные нейтронно-физические и теплогидравлические расчеты, моделирование нестационарных и аварийных процессов». Программный комплекс (ПК) КОРСАР/ГП, о котором пойдет речь в данной работе, принадлежит именно к этой области расчетов.

Для аттестации необходимо разработать верификационный отчет, в котором содержится информация об области применения программного средства. Однако после получения аттестационного паспорта, как правило, работы по верификации продолжают. Разработчик или пользователь заинтересованы в том, чтобы более точно определить допустимую область использования программы, погрешность расчета, найти «слабые» места кода, выявить направления для улучшения и модернизации кода, отладить код под решение конкретных задач.

ПК КОРСАР/ГП аттестован 23 сентября 2009 года [2]. Однако все еще является важным направлением работ отладка кода для решения задач, в которых большое значение имеют распределенные в пространстве реактора процессы, т. е. задачи, которые неточно решаются в одномерном приближении.

В данной работе рассматриваются две международные задачи, основанные на экспериментальных данных:

1. Задача V1000СТ-2: экспериментальные данные о закрытии быстродействующего запорно-отсечного клапана (БЗОК) на паропроводе на малой мощности на 6-ом энергоблоке АЭС Козлодуй [3].

2. Задача об отключении 1-го из 4-х работающих главных циркуляционных насосов на 3-ем энергоблоке Калининской АЭС [4].

На основе этих задач код (файл входных данных) настраивается для моделирования 3-хмерных теплогидравлических процессов внутри реактора.

## Краткое описание ПК КОРСАР/ГП

ПК КОРСАР/ГП разработан и по сей день совершенствуется в НИТИ им. Александра, г. Сосновый бор. Некоторые модули написаны в ОКБ «Гидропресс» и включены в основной текст программы.

Главным образом ПК КОРСАР/ГП ориентирован на расчет теплогидравлических схем разного характера и на сопряженный нейтронно-физический и теплогидравлический расчет реакторных установок и блоков в целом. Кроме того, для реакторных задач возможно также подключение расчета термомеханики твэла и перемешивания теплоносителя в напорной камере реактора с помощью специального элемента «Камера» (расчет перемешивания возможен и без него).

Теплогидравлический расчет в ПК КОРСАР/ГП проводится в одномерном приближении на основе двухжидкостной полностью неравновесной модели с равными давлениями фаз. Конечно-разностная аппроксимация уравнений сохранения построена на следующих принципах. В основе пространственной дискретизации лежит метод контрольных объемов. Для временной аппроксимации выбрана полуневьяная схема. При этом для исключения итераций при численном решении неявные члены линеаризуются. Линеаризация приводит к дисбалансам масс и энергии, которые вычисляются на одном временном слое и учитываются как источники в следующем.

Для нейтронно-физического расчета используется трехмерное диффузионное приближение с 2-мя энергетическими группами и 6-ю группами запаздывающих нейтронов. Возможно применение двух конечно-разностных схем. Первая является «классической» схемой, вторая – метод коррекции коэффициентов диффузии (метод Аскью-Такеда). Обычно в плане для гексагональных тепловыделяющих сборок (ТВС) используется по 6 расчетных узлов на одну сборку (в общем случае возможно использование

расчетных схем с 1, 6 и 24 расчетными узлами на гексагональную ячейку кассеты).

Распределение нейтронов в активной зоне зависит от параметров, называемых параметрами обратных связей. Для расчетов по ПК КОРСАР/ГП обычно в качестве параметров обратных связей выбирают температуру топлива, плотность теплоносителя и концентрацию борной кислоты в теплоносителе (в граммах борной кислоты на килограмм теплоносителя). Также вид нейтронного поля зависит от положения стержней регулирования и защиты, выгорания, концентрации ксенона-135 и самария-149. Вообще говоря, оказывают влияние и другие параметры, например, выгорание стержней управления и защиты, плотность конструкционных материалов, но это влияние слабое, и им пренебрегают.

Нейтронное поле в КОРСАР/ГП не рассчитывается непосредственно по значениям параметров обратных связей. В нейтронно-физических уравнениях фигурируют так называемые макроскопические сечения и другие параметры, все вместе их часто называют макросечениями. Через макросечения осуществляется в расчете связь между параметрами обратных связей и нейтронным полем (рис. 1).

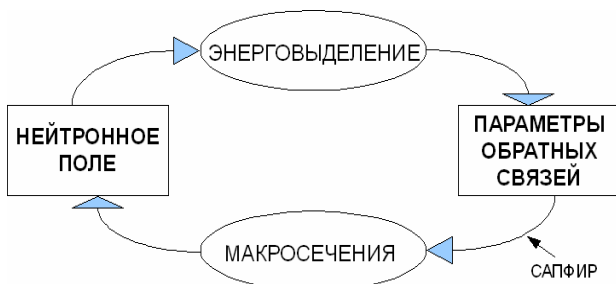


Рис. 1. Обратная связь

Зависимость макросечений от параметров обратных связей в ПК КОРСАР/ГП задается в виде заранее определенных многомерных таблиц. В ячейках таблиц находятся значения макросечений для узловых значений параметров обратных связей. Между узлами значения макросечений интерполируются с помощью степенных многочленов.

Для данной работы таблицы макросечений были получены с помощью программного комплекса САПФИР\_95&RC\_ВВЭР, также написанного в НИТИ им. Александрова [5].

### Нодализационная схема

Для расчета теплогидравлических установок в ПК КОРСАР/ГП, как и в других кодах такого рода, необходимо описать установку в виде схемы расчетных элементов, называемой нодализационной схемой. Эти элементы представляют собой математические модели отдельных частей установок – труб, стенок труб и различных объемов, теплообменников, гидравлических сопротивлений, тепловыделяющих элементов и прочего. Часто расчетные элементы являются значительным упрощением реальных объек-

тов. Возможны ситуации, когда используемым расчетным элементам нельзя поставить в соответствие реальные объекты установки (например, сопротивление, возникающее от изменения профиля потока в трубе). И наоборот, реальные объекты не всегда отражены в нодализационной схеме для упрощения и ускорения расчета. От того, как составлена нодализационная схема, в значительной степени зависит результат расчета. Основная задача данной работы – это построение и отладка разветвленной нодализационной схемы реактора ВВЭР-1000.

Главным расчетным элементом в ПК КОРСАР/ГП является канал. Вся гидравлическая часть описывается в основном каналами и вспомогательными элементами. Канал состоит из расчетных объемов, называемых ячейками. Канал – одномерный элемент (если в нем более одной ячейки), в то время как ячейка – точечный элемент (не имеет измерений). Одной из важных характеристик нодализационной схемы является количество контрольных объемов, то есть ячеек. Схема с большим количеством ячеек более подробно описывает реальную установку. Однако использование слишком большого числа ячеек, их измельчение может оказаться некорректным. Большое влияние также оказывают расположение ячеек, их геометрическая ориентация и связи между ними.

### Реакторная установка с реактором типа ВВЭР-1000

Реакторные установки 3-го блока Калининской АЭС и 6-го блока АЭС Козлодуй практически одинаковы (проект В-320). Поэтому для обеих задач, рассмотренных в работе, используется одна и та же нодализационная схема реактора.

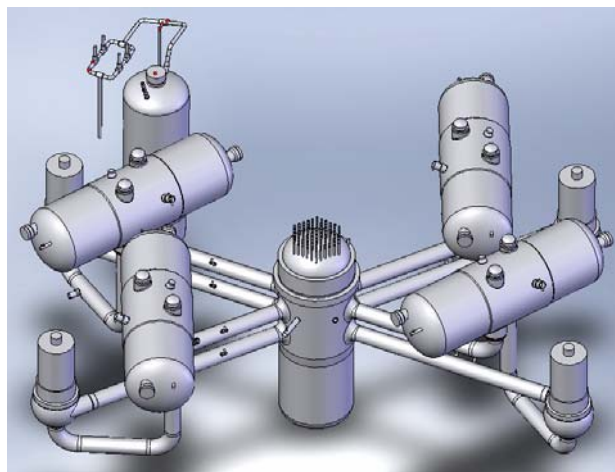


Рис. 2. Реакторная установка

Реакторная установка состоит из реактора, 4-х парогенераторов, 4-х главных циркуляционных насосов (ГЦН), компенсатора давления и главного циркуляционного трубопровода, образующего 4 петли (рис. 2). Теплоноситель после активной зоны выхо-

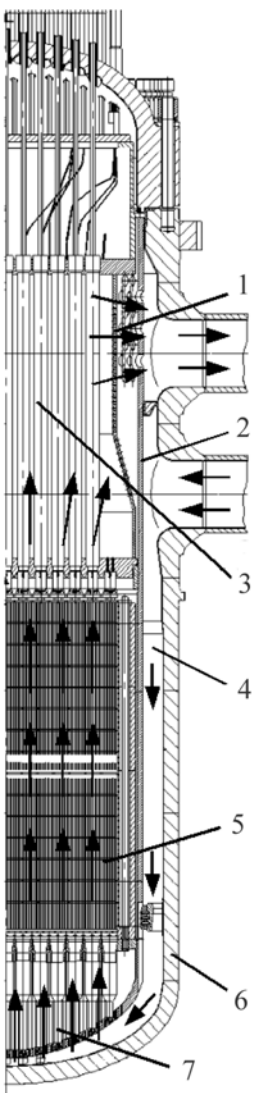


Рис. 3. Реактор

дит из реактора через «горячие» патрубки в трубопровод (верхняя часть, короткий участок). По трубопроводу он подается в парогенератор, где передает тепло теплоносителю второго контура. Охлажденный теплоноситель первого контура выходит из парогенератора и по трубопроводу (нижняя часть, длинный участок) через ГЦН поступает обратно в реактор. Теплоноситель второго контура (вода) кипит, выходит из парогенератора и подается по паропроводам на турбину. На каждом паропроводе установлен БЗОК.

Направление течения теплоносителя в реакторе, внутрикорпусные устройства и камеры реактора схематично изображены на рис. 3.

Теплоноситель из четырех петель, поступающая через четыре «холодных» патрубка, попадает в опускной участок (поз. 4) напорной камеры, имеющий форму кольца (кольцевой зазор между шахтой 2 и корпусом 6). В нем он опускается до подъемного участка напорной камеры (поз. 7).

В напорной камере теплоноситель из разных петель частично перемешивается. Из напорной камеры теплоноситель подается в активную зону (поз. 5), омывая ее, нагревается и по-

дает в сборную камеру (поз. 3). Сборная камера в основном представляет собой пространство между трубами диаметром 108 и 180 мм в блоке защитных труб (БЗТ, поз. 1). В сборной камере теплоноситель также частично перемешивается и выходит из реактора через четыре «горячих» патрубка, расположенных строго над «холодными».

Большая часть задач для обоснования безопасности не требует моделирования перемешивания теплоносителя в реакторе и моделирования нейтронного поля в 3-мерном приближении. Однако часть задач при таком подходе считается плохо. Для них необходимо указанное моделирование. Теплогидравлический расчет в ПК КОРСАР/ГП является одномерным. Возникает нетривиальная задача моделировать сложные 3-мерные теплогидравлические процессы одномерным кодом. Для этого необходимо составить разветвленную нодализационную схему из одномерных элементов (каналов), связанных между собой, отладить и проверить ее с помощью экспериментальных данных. Этой задаче и посвящена данная работа.

### Напорная камера реактора

Нодализационная схема напорной камеры настраивалась на основе экспериментальных данных, содержащихся в спецификации к международной тестовой задаче V1000СТ-2 о разрыве паропровода. Эти данные получены из испытаний по закрытию БЗОК на 6-м энергоблоке АЭС Козлодуй на малой мощности. В ПК КОРСАР/ГП моделировались только «холодные» патрубки реактора и напорная камера. При таком подходе один расчет занимал немного времени, и была возможность решить оптимизационную задачу по наладке схемы.

Нодализационная схема (рис. 4) состоит из 4-х горизонтальных каналов для патрубков, 42-х вертикальных каналов для опускного участка и 163-х каналов (по числу тепловыделяющих сборок) для подъемного участка – всего 749 ячеек. Ячейки соседних каналов связаны друг с другом.

Закрытием БЗОК парогенератор 1-й петли был

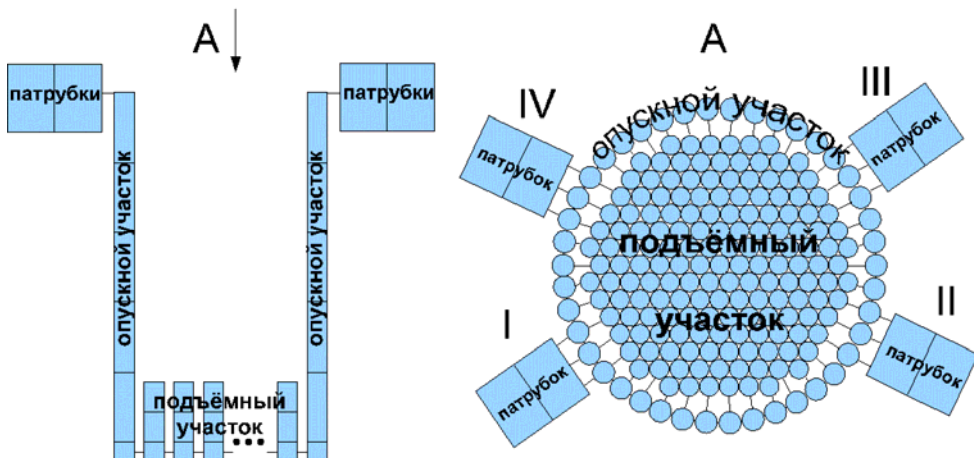


Рис. 4. Нодализационная схема напорной камеры

отсечен от турбины. Также была прекращена подача питательной воды в парогенератор. Тепло в 1-й петле перестало отводиться от первого контура. Поэтому теплоноситель 1-й петли нагрелся на  $13,6\text{ }^{\circ}\text{C}$  (в «холодном» участке). Более теплый теплоноситель, частично смешиваясь с теплоносителем других петель в напорной камере, поступал в активную зону. Температурные датчики регистрировали распределение температуры в активной зоне (в тепловыделяющих сборках). Таким образом, на основе этого эксперимента можно проверить и отладить моделирование течения и перемешивания теплоносителя в напорной камере.

При анализе полученных данных был выявлен эффект закручивания теплоносителя в напорной камере. Он заключается во вращении потока теплоносителя относительно вертикальной оси, проходящей через центр реактора. Этот эффект моделировался в ПК КОРСАР/ГП с помощью вспомогательных элементов нодализационной схемы типа «местное сопротивление», не соответствующих реальным объектам. Элементы «местное сопротивление» были таким образом распределены по опускному участку, чтобы в расчете создавался эффект закручивания. Для всех элементов задавалось одно и то же значение коэффициента гидравлического сопротивления  $\alpha$ .

Для регулирования интенсивности перемешивания в ПК КОРСАР/ГП используется элемент «турбулентное перемешивание». Этим элементом связываются ячейки соседних каналов, между которыми рассчитывается обмен различными субстанциями. Математическая модель элемента очень проста: интенсивность перемешивания (расход субстанций) линейно зависит от расхода теплоносителя в канале. В соотношении используется коэффициент  $\beta$ , характеризующий интенсивность турбулентного перемешивания, который задается пользователем.

Была поставлена задача оптимизации (поиска минимума) среднеквадратичного отклонения расчетных температур теплоносителя в тепловыделяющих сборках от экспериментальных. В эксперименте регистрировались значения температур для 96 тепловыделяющих сборок с погрешностью порядка  $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Управляющими параметрами в задаче являлись коэффициенты  $\alpha$  и  $\beta$ . Для решения применялся метод наискорейшего градиентного спуска [6].

В результате были получены значения коэффициентов  $\alpha$  и  $\beta$ , при которых среднеквадратичное отклонение расчетных температур от экспериментальных составило  $0,7\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Максимальное отклонение –  $2,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ . При полученных значениях управляющих параметров почти все значения расчетных температур совпадают с экспериментальными в области погрешности.

Область применения полученного значения параметра  $\beta$  для реакторных установок должна быть выявлена на основе других полученных в экспериментах и испытаниях на блоках данных, на основе которых можно было бы судить о перемешивании теплоносителя в камерах реактора. Испытания и экс-

перименты должны быть проведены в различных режимах работы реакторной установки: при работе разного числа петель, при разных температурах теплоносителя и т. д. Тогда для этих режимов и подобных им станет возможным вычисление коэффициента  $\beta$ , как это и было сделано в рамках данной работы.

Полученное значение коэффициента  $\alpha$  можно применять только для рассмотренной реакторной установки (6-ой энергоблок АЭС Козлодуй), поскольку эффект закручивания потока различается даже для реакторных установок одного проекта. Коэффициент  $\alpha$  может применяться только в задачах с похожими условиями (расход теплоносителя, работа всех 4-х ГЦН, отсутствие паровой фазы).

### Сборная камера реактора

Сборная камера реактора состоит из блока защитных труб, пространства над ним (под крышкой реактора), кольцевого зазора между шахтой и корпусом и патрубков. Нодализационная схема (рис. 5) состоит из следующих частей:

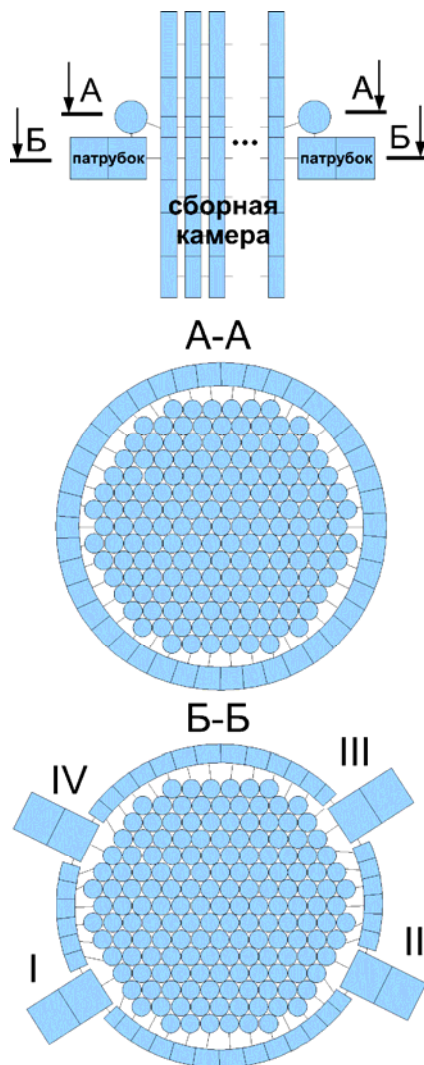


Рис. 5. Нодализационная схема сборной камеры

– 163 вертикальных канала для блока защитных труб и пространства над ним;

– 4 горизонтальных канала для нижней части (около патрубков) пространства между шахтой и корпусом (каналы расположены от патрубка до патрубка);

– 1 горизонтальный кольцевой канал для верхней части пространства между шахтой и корпусом;

– 4 горизонтальных канала для патрубков.

Всего 1229 ячеек.

Кроме того, в нодализационной схеме были использованы элементы типа «местное сопротивление» для моделирования сопротивления плитами и обечайками внутрикорпусных устройств (трубы, обечайка и все плиты блока защитных труб, обечайка шахты). Поскольку распределение параметров теплоносителя (расходы, температуры) в сборной камере не описывается в одномерном приближении, то значения коэффициентов гидравлического сопротивления имеют условный характер.

Отладка схемы произведена на основе эксперимента на 3-м энергоблоке Калининской АЭС по отключению одного главного циркуляционного насоса из четырех работающих. Эксперимент был проведен 2 октября 2005 года. В момент отключения ГЦН параметры реакторной установки соответствовали номинальным.

Отключенный насос не останавливается сразу после прекращения подачи на него питания. В целях сохранения в течение некоторого времени расхода теплоносителя первого контура на ГЦН установлен маховик. Поэтому после отключения питания начинается выбег насоса. Постепенно расход в петле с отключенным ГЦН уменьшается до нуля (примерно за 20–25 с), а затем наступает обратный ток, то есть теплоноситель течет в обратную сторону под действием оставшихся в работе ГЦН. В петле устанавливается постоянный отрицательный расход. В соответствии с регламентом эксплуатация реакторной установки с 3-мя работающими ГЦН возможна на мощности не более 67 % от номинальной. Поэтому, в переходном процессе включается регулятор ограничения мощности и снижает мощность до 67 % путем частичного введения 10-й и 9-й групп стержней управления и защиты.

Итак, после отключения ГЦН 1-ой петли в ней начался обратный ток теплоносителя. Теплоноситель из смежных петель (2-й и 4-й) в опускном участке частично поступал в первую петлю. Затем, после прохождения парогенератора, охлажденный теплоноситель 1-й петли попадал в сборную камеру реактора через «горячий» патрубок. В сборной камере он распределялся по другим петлям, оказывая влияние на их температуры в той мере, в какой он в них попадал. Больше влияние теплоноситель 1-й петли оказывал на 4-ю петлю, поскольку патрубок 4-й петли расположен ближе других к патрубку 1-й петли. Можно сделать вывод, что процесс характеризуется сложным процессом перемешивания теплоносителя в сборной камере.

Для получения граничных условий на входе в сборную камеру решалась задача для реактора в целом с граничными условиями на его патрубках, взятыми из эксперимента. При решении этой вспомогательной задачи был использован ранее найденный коэффициент  $\beta$  для турбулентного перемешивания в опускном участке и напорной камере (см. выше). Закручивание потока не моделировалось.

Отладка схемы состояла в выборе значений коэффициентов гидравлического сопротивления. Всего рассматривалось 3 коэффициента для элементов типа «местное сопротивление», моделирующих сопротивление следующих реальных объектов: труб БЗТ, обечайки БЗТ, обечайки шахты, и 1 коэффициент для длинных элементов типа «канал», связывающих патрубки в нижней части пространства между шахтой и корпусом. Последний коэффициент условный, поскольку не соответствует реальному объекту. Он требуется для того, чтобы отрегулировать соотношение расходов теплоносителя от петли с обратным током к ближнему и дальнему патрубкам вдоль пространства между шахтой и корпусом.

Отладка схемы производилась по отклонениям расчетных температур теплоносителя в «горячих» участках петель с прямым током от экспериментальных. Поставить оптимизационную задачу, как в предыдущей ситуации, не удалось из-за неподходящей зависимости этих температур от коэффициентов сопротивления. Оказалось, что с возрастанием от нуля каждого коэффициента после некоторого значения расчетные температуры почти перестают меняться, выходят на «плато». Значения расчетных температур на «плато» и экспериментальных приведены в таблице 1. Отклонение расчетных температур от экспериментальных не превышает 1,3 °С. Погрешность измерений составила около 2 °С, так что расчетные и экспериментальные значения совпадают в области погрешности.

Таблица 1  
Температура теплоносителя в «горячих» участках петель

Петля	Экспериментальное значение, °С	Расчетное значение, °С	Отклонение, °С
1	277,0	277,0 (граничное условие)	–
2	311,3 – 311,9	310,4	1,3
3	313,1 – 313,7	312,7	0,7
4	303,2 – 305,1	305,0	0,7
Среднеквадратичное отклонение по 3-м петлям			0,9

Поскольку расчетные температуры не зависят от коэффициентов при их значениях больше пороговых, в настоящих расчетах эти значения выбираются исходя из перепадов давлений в номинальном режиме. При этом ведется контроль, чтобы значения не были меньше пороговых.



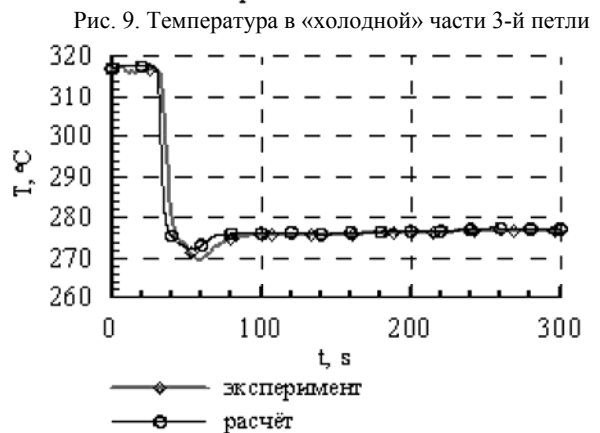
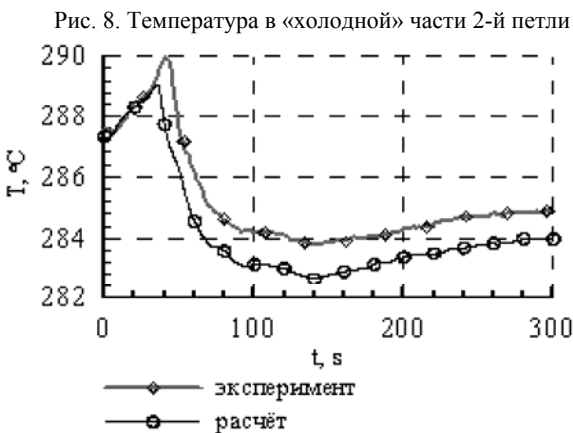
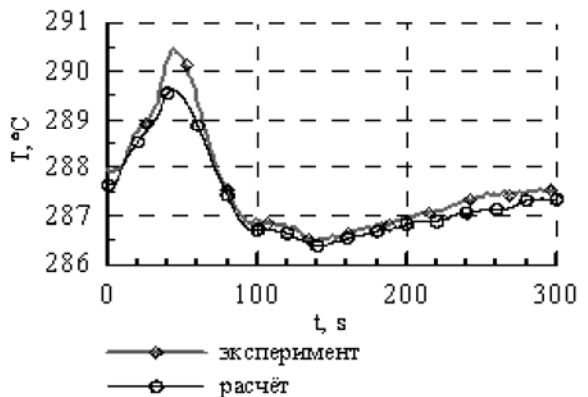
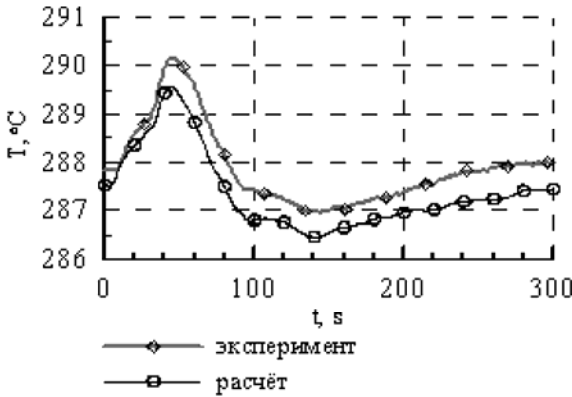
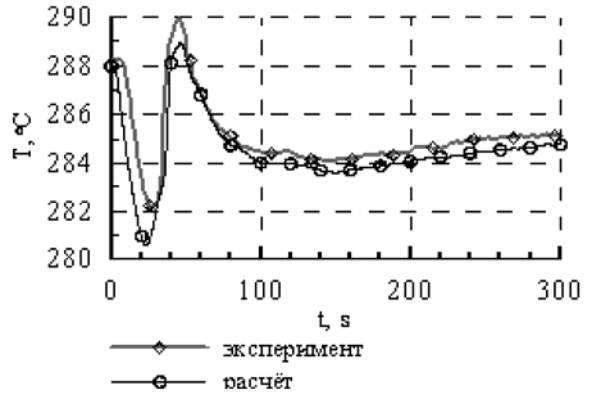
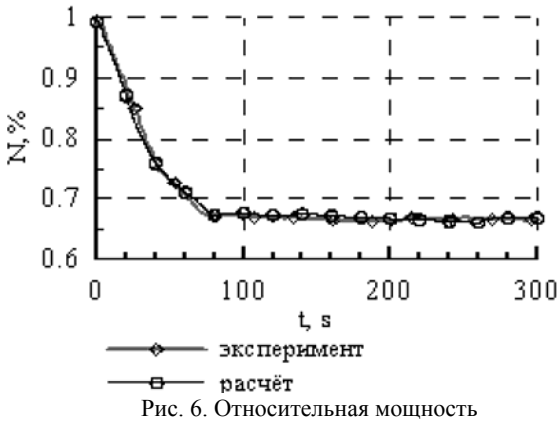
## Решение задачи об отключении одного ГЦН из 4-х работающих с моделированием 1-го контура

Оптимизированная нодализационная схема реактора в составе схемы реакторной установки (первого контура) была использована при решении задачи об отключении одного главного циркуляционного насоса из четырех работающих на 3-м энергоблоке Калининской АЭС (см. выше). При этом моделировалось не только стационарное состояние, но и переходный процесс.

При моделировании приняты граничные условия на парогенераторах по температуре питательной воды и уровню. Последнее из них было реализовано в виде расхода питательной воды для установления заданного уровня.

На рис. 6 построен график изменения тепловой мощности реактора. Экспериментальный и расчетный графики хорошо согласуются между собой.

На рис. 7–14 изображены экспериментальные и расчетные графики температур в петлях. Погрешность измерения термопар около  $2^\circ\text{C}$ . Расчетные значения температур представлены для мест расположения термопар. Можно отметить, что в целом температура 1-го контура в расчете оказалась ниже, чем в эксперименте. Скорее всего, это связано с несовершенством модели парогенератора. В расчете принята простая модель парогенератора в точечном приближении. Возможно, при использовании более сложной модели (например, при моделировании парогенераторов элементами типа «канал») результаты расчета будут ближе к экспериментальным. В целом, расчетные графики хорошо согласуются с экспериментальными.



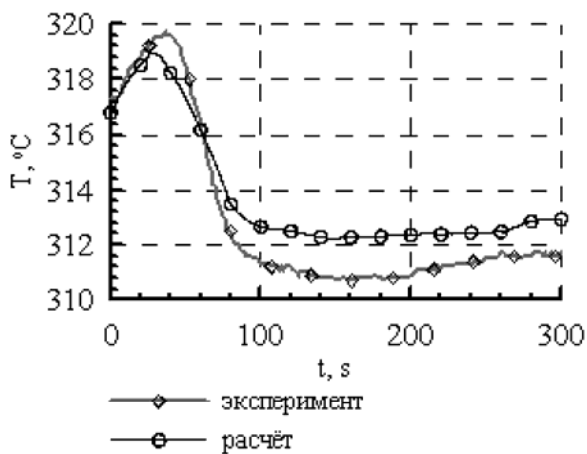


Рис. 12. Температура в «горячей» части 2-й петли

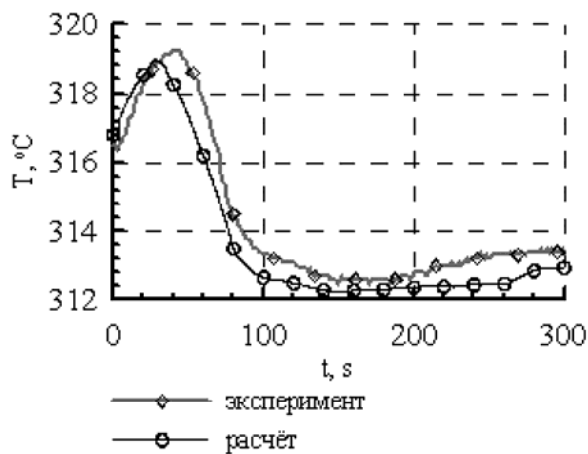


Рис. 13. Температура в «горячей» части 3-й петли

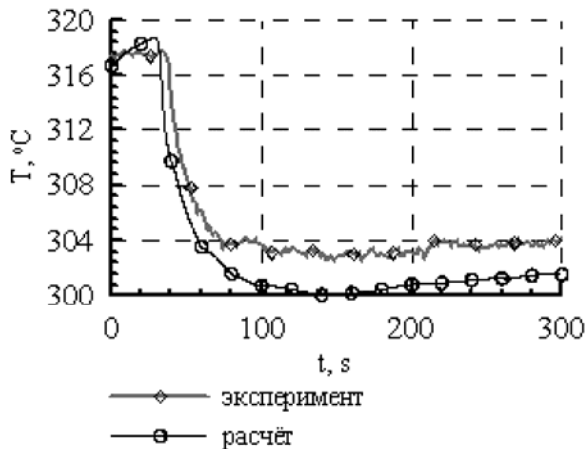


Рис. 14. Температура в «горячей» части 4-й петли

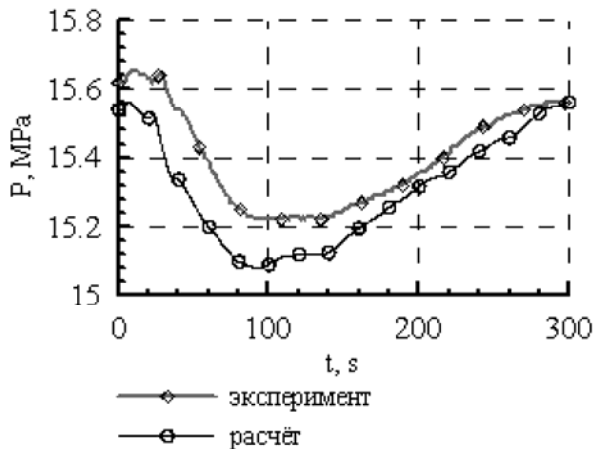


Рис. 15. Абсолютное давление над активной зоной

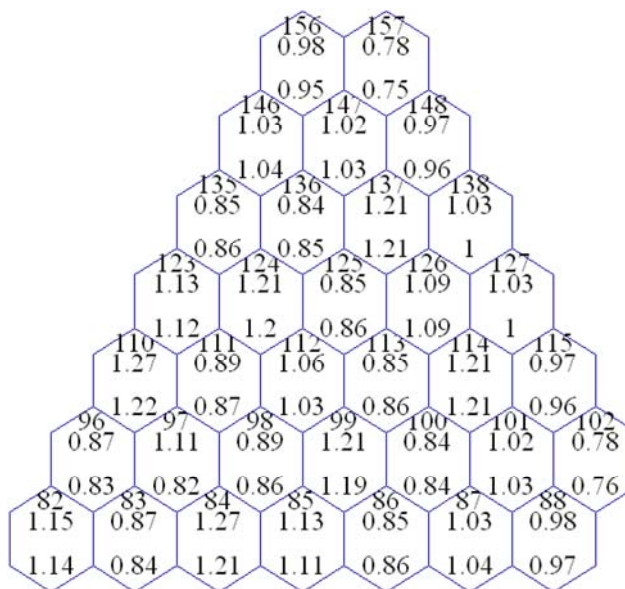


Рис. 16. Относительное энерговыделение в ТВС до переходного процесса в секторе активной зоны (сверху вычисленные значения, снизу – экспериментальные)

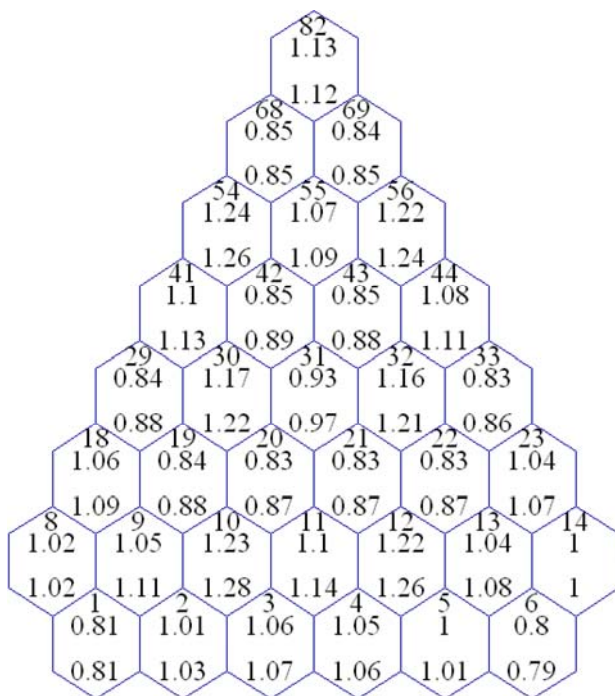


Рис. 17. Относительное энерговыделение в ТВС после переходного процесса в секторе активной зоны (сверху вычисленные значения, снизу – экспериментальные)

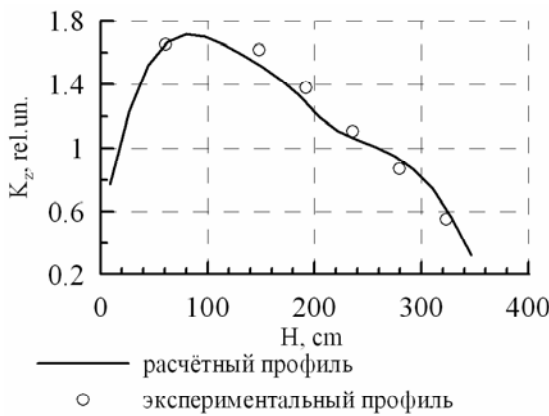


Рис. 18. Профиль энерговыделения в ТВС № 65

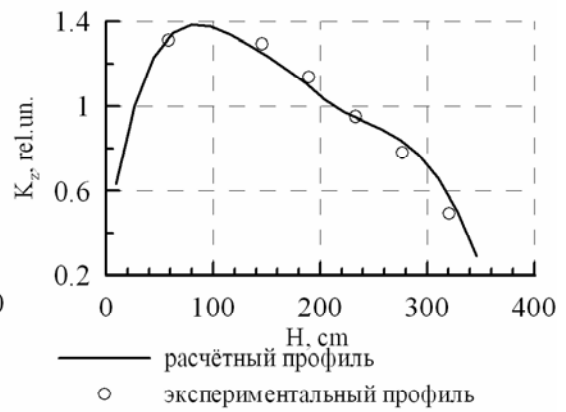


Рис. 19. Высотный профиль энерговыделения в активной зоне

На рис. 15 представлен график абсолютного давления над активной зоной. Расчетный и экспериментальный графики удовлетворительно согласуются.

На рис. 16–17 изображены картограммы относительного энерговыделения в тепловыделяющих сборках. Различие между экспериментальными и расчетными значениями не превышает 6 %, кроме ТВС № 97. ТВС № 97 была внепланово заменена в ходе эксплуатации, что не было учтено в расчете. Данное допущение слабо отражается на других параметрах. Экспериментальный и расчетный высотные профили энерговыделения также хорошо согласуются между собой (рис. 18–19).

Результаты расчетов показывают, что нодализационная схема составлена корректно и удовлетворительно моделирует реактор.

### Заключение

Данная работа посвящена разработке и проверке нодализационной схемы, описывающей реактор типа ВВЭР-1000. Построенная схема содержит более 5,5 тыс. контрольных объемов.

Проведены наладка и испытание нодализационной схемы с помощью двух международных задач, основанных на экспериментальных данных с 3-го энергоблока Калининской АЭС и с 6-го энергоблока АЭС «Козлодуй». Первая из задач была решена также с моделированием всего первого контура. Сопоставление результатов расчетов и экспериментальных данных обосновывает применимость нодализационной схемы к подобным расчетам.

Разработан способ для моделирования эффекта закручивания потока в опускном участке реактора. В рамках этого способа модель должна подстраиваться

под конкретную установку по экспериментальным данным.

Разработанная нодализационная схема позволяет моделировать перемешивание теплоносителя в напорной и сборной камерах реактора. В настоящее время работы по верификации схемы в части выявления области ее применения и погрешности расчетов продолжаются.

### Литература

1. Правила ядерной безопасности реакторных установок атомных станций, НП-082-07.
2. Программный комплекс КОРСАР/ГПИ, аттестационный паспорт программного средства № 263 от 23.09.2009, НТЦ ЯРБ.
3. Kolev N., Aniel S., Royer E., Bieder U., Popov D., Topalov Ts. VVER-1000 Coolant Transient Benchmark (V1000CT) // Volume II: «Specifications of the VVER-1000 Vessel Mixing Problems», OECD Nuclear Energy Agency, 2004.
4. Терешонок В. А., Степанов В. С., Ивченков В. В., Питилимов В. А., Никонов С. П. Описание переходного динамического процесса, обусловленного отключением одного из четырех работающих ГЦН на номинальной мощности блока № 3 Калининской АЭС.
5. Artyomov V. G., Elshin A. V., Ivanov A. S. et al. Development of neutron-physics models of varies types of reactors on the basis of unified algorithms of applied code package SAPFIR // Proceedings of the 10-th International Seminar on Reactor Physics, Moscow, 2–6 September, 1997.
6. Боглаев Ю. П. Вычислительная математика и программирование: Учеб. пособие для студентов вузов. М.: Высш. шк., 1990.