

# СТАТЬИ

УДК 621.039.50

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕХОДНОГО ПРОЦЕССА В ВВЭР-1200 С ПОМОЩЬЮ СОПРЯЖЕННОГО НЕЙТРОННО-ФИЗИЧЕСКОГО И ТЕПЛОГИДРАВЛИЧЕСКОГО КОДА ATHLET/VIPR-VVER

Байков А.В., Дубов А.А., Коцарев А.В., Шумский Б.Е. (НИИ «Курчатовский ин-т», г. Москва)  
e-mail: baykov\_av@nrcki.ru

Испытания, проводимые на этапе пуска энергоблока, призваны подтвердить, что элементы реакторной установки и энергоблок в целом смонтированы и функционируют в соответствии с проектом. Одним из таких испытаний является проверка режима подключения главного циркуляционного насосного агрегата (ГЦНА) при трех работающих. Целями проведения испытания являются измерение отклонений параметров реактора и первого контура от исходных в переходных процессах, а также подтверждение отсутствия непредусмотренного проектом срабатывания технологической защиты, блокировок и сигнализаций. Физическая суть явления, возникающего при испытании, заключается в следующем. При подключении ГЦНА в активную зону поступает холодная вода из отключенной петли. В результате вводится положительная реактивность из-за отрицательной обратной связи по температуре теплоносителя и положительной обратной связи по плотности теплоносителя.

С помощью программы ATHLET/VIPR-VVER (Россия, Германия) проведено моделирование эксперимента по подключению одного ГЦНА при трех работающих, выполненного на этапе пусконаладочных работ первого энергоблока Нововоронежской АЭС-2.

Для ВВЭР-1200 перед началом испытания согласно методике исходный уровень мощности должен быть не выше 30%. В исходном состоянии реактор работал с отключенной петлей № 2. Основные параметры реактора перед началом испытания следующие:

Мощность реактора:	
средневзвешенная (усредненная с весовыми коэффициентами по пяти способам расчета), МВт . . .	840
средневзвешенная, % . . .	26,3
по аппаратуре контроля нейтронного потока (АКНП), % . . .	29,5
Давление на выходе из реактора, МПа . . .	15,8
Температура теплоносителя на входе в реактор, °С . . .	289,2
Положение рабочей группы ОР СУЗ, % . . .	56
Расход теплоносителя в работающей петле, кг/с . . .	5300

В ходе испытания давление во втором контуре поддерживалось на уровне  $6,8 \pm 0,02$  МПа.

Переходный процесс моделировали с помощью программного комплекса ATHLET/VIPR-VVER, предназначенного для связанного нейтронно-теплогидравлического расчета нестационарных процессов в ядерных энергетических установках с водо-водяными реакторами типа ВВЭР. ATHLET/VIPR-VVER представляет собой комплекс из двух сопряженных программ: теплогидравлической ATHLET и нейтронно-физической БИПР-8. Код ATHLET состоит из нескольких основных модулей, позволяющих описывать физические процессы в легководных реакторах: теплогидравлический модуль, модуль теплообмена и теплопроводности, модуль для описания работы оборудования и др. Теплогидравлический модуль основывается на решении пяти дифференциальных уравнений: уравнения непрерывности для воды и пара, уравнения сохранения энергии для воды и пара, уравнение сохранения количества движения для пароводяной смеси. Система уравнений дополняется алгебраическими соотношениями, связывающими скорость обеих фаз. Кроме того, модуль позволяет моделировать неконденсируе-

мые газы и описывать перенос бора в системе. Система циркуляции теплоносителя моделируется соединением базовых термодинамических объектов. В активной зоне реактора расчеты проводятся в предположении отсутствия перепадов между ТВС. Теплогидравлическая модель каждой ТВС представляет изолированный канал, соединенный с общим объемом реактора только на входе и выходе ТВС.

Программа БИПР-8 основана на двухгрупповом диффузионном приближении. В ней используется трехмерная гексагональная нодализация для описания всех ТВС в активной зоне и отражателей. В настоящем исследовании использовалось разбиение на 10 слоев по высоте для топливной части и по одному слою сверху и снизу для торцевых отражателей. С помощью стационарной части программы БИПР-8 рассчитываются распределение энерговыделения по нодам, выгорание и перегрузка. Библиотеки нейтронно-физических констант для БИПР-8 предварительно рассчитываются по программе ТВС-М с учетом свойств ТВС различного типа, выгорания топлива, параметров теплоносителя и температуры топлива, отравления ксеноном и самарием. Нейтронно-физические свойства отражателей рассчитываются по программе ПЕРМАК. Кинетический модуль программы БИПР-8 рассчитывает изменение во времени мощности реактора и трехмерную деформацию нейтронного потока вследствие перемещения ОР СУЗ, параметров теплоносителя и концентрации борной кислоты с учетом шести групп запаздывающих нейтронов и эффектов обратных связей.

Модель первого контура представлена четырьмя петлями циркуляции. В каждой петле выделены три макроучастка: горячая нитка, трубки парогенератора, холодная нитка с ГЦНА. Каждый макроучасток разделен на расчетные объемы. В составе реактора моделируются опускной участок, нижняя камера смешения, все ТВС, протечки теплоносителя мимо активной зоны, верхняя камера смешения, пространство под крышкой реактора с блоком защитных труб. В каждой ТВС выделено 10 участков по высоте активной зоны, в которые итеративно передаются значения энерговыделения из БИПР-8.

Модель второго контура состоит из следующих основных групп элементов: парогенераторы с коллектором пара и уровнемером, систе-

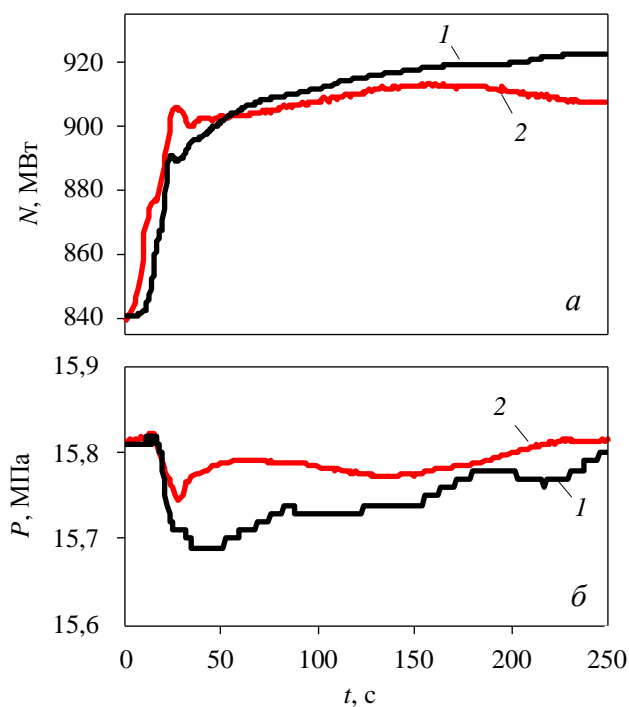
ма паропроводов от парогенератора до турбины, предохранительные клапаны, быстродействующие редуцирующие установки сброса пара в атмосферу и конденсатор, быстродействующий запорный обратный клапан, системы аварийного расхолаживания парогенератора, пассивного теплоотвода, отбор пара на турбину, система трубопроводов, проходящих от насосов питательной воды до коллектора питательной воды парогенератора, включая регулируемую и запорную арматуру.

Для моделирования испытания предварительно было рассчитано исходное состояние реакторной установки. Для исходного состояния проведено сравнение радиального распределения энерговыделения, рассчитанного по программе БИПР-8, с данными системы внутриреакторного контроля (СВРК). Сравнению подлежало энерговыделение только в ТВС с датчиками. Максимальное отклонение составило 5,1%.

Исходная мощность в расчете была настроена на средневзвешенную 26,3%. При сравнении экспериментальная мощность по АКНП была тарирована на исходную средневзвешенную. Непосредственное сравнение в динамике со средневзвешенной мощностью было невозможно, так как при быстром и значительном возмущении параметров первого и второго контуров средневзвешенная мощность недоступна для интерпретации в качестве мощности реактора за время переходного процесса. Таким образом, использовалась только устоявшаяся исходная средневзвешенная мощность.

Основные параметры реакторной установки перед подключением петли при расчете по программе ATHLET/ВІР-VVER были настроены на данные энергоблока и совпадали с ними в пределах погрешности. При моделировании давление на выходе из парогенераторов поддерживалось на заданном уровне в соответствии с методикой испытания.

Расчетная и измеренная по АКНП нейтронная мощность без учета пространственного эффекта показана на рис. 1. Пространственный эффект, влияющий на показания ионизационных камер, связан с неравномерным захолаживанием активной зоны и неравномерной по периметру опускного участка плотностью теплоносителя при подключении ГЦНА. Неравномерное захолаживание вызывает деформацию



Р и с. 1. Расчетная (1) и измеренная мощность (2) реактора (а) и давление теплоносителя (б)

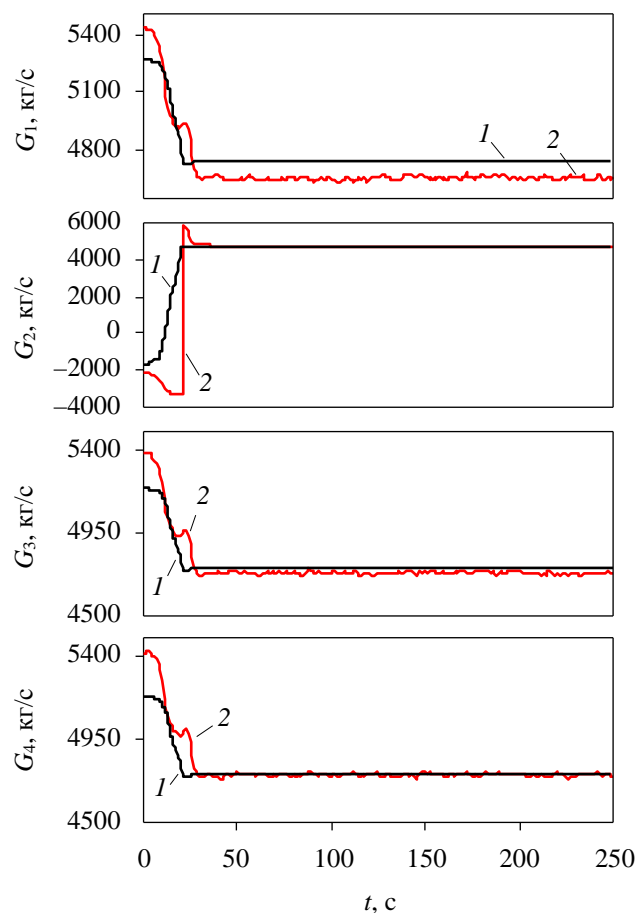
поля энерговыделения, локальное увеличение плотности теплоносителя в опускном участке ослабляет поток быстрых нейтронов, детектируемых ближайшими ионизационными камерами. Скачкообразное увеличение мощности реактора составило 2,1% номинальной и 7,1% исходной мощности.

Проведено посекундное сравнение расчетной и измеренной мощности. Получены следующие оценки отклонения:

Абсолютное отклонение, МВт:	
максимальное (по модулю) . . .	26,5
среднеарифметическое . . .	7,7
стандартный разброс . . .	14,5
Относительное отклонение, %:	
максимальное (по модулю) . . .	3
среднеарифметическое . . .	-0,4
стандартный разброс . . .	1

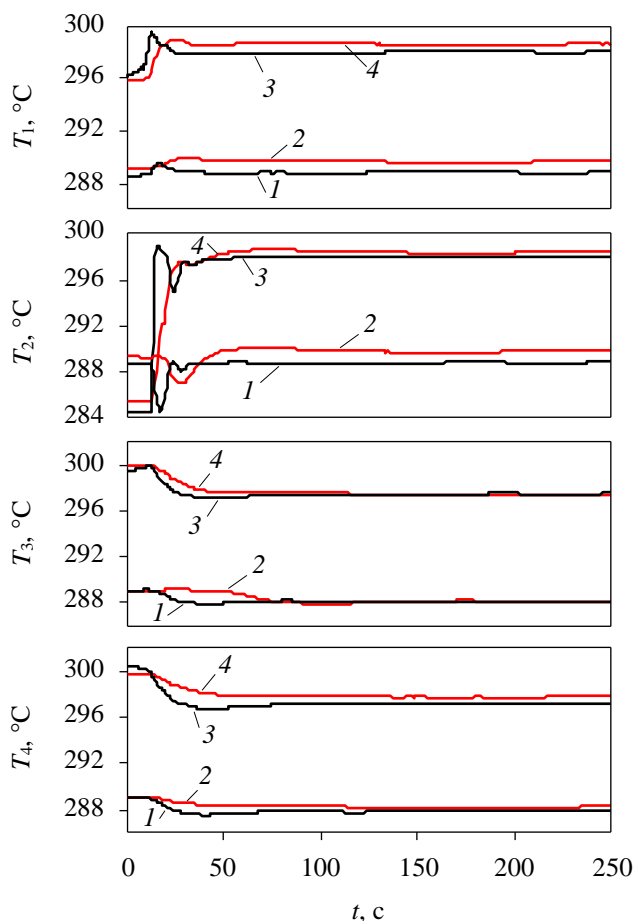
Расчетное давление теплоносителя на выходе реактора в ходе переходного процесса совпадает с измеренным в пределах 0,05 МПа (см. рис. 1).

В течение первых 30 с после включения ГЦНА наблюдается качественное различие расчетного и измеренного расхода теплоносителя по петлям при изменении расхода по второй петле (рис. 2). Это можно объяснить различием методик расчета расхода в ATHLET/BIPR-



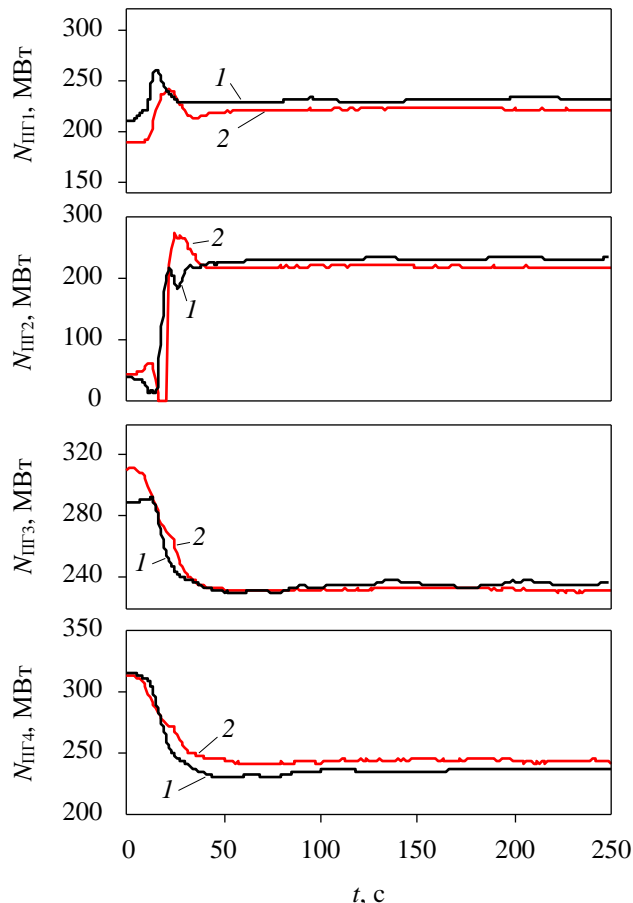
Р и с. 2. Расчетный (1) и измеренный расход (2) теплоносителя по петлям

VVER и системе внутрореакторного контроля. Экспериментальный расход рассчитывается с помощью программного обеспечения системы внутрореакторного контроля по перепаду давления на ГЦНА. Аномальное изменение расхода во второй петле после включения ГЦНА связано с переходом в программном обеспечении системы внутрореакторного контроля на расчет по прямому току. Расход в ATHLET/BIPR-VVER является решением уравнений сохранения массы в элементарном объеме с учетом перетока через соединения сопряженных объемов. Положительный и отрицательный расходы соответствуют прямому и обратному току, который принимается для каждого моделируемого объекта. Показанный на рис. 2 расход рассчитывается в холодной нитке перед выходными патрубками. Изменение знака расхода с отрицательного на положительный с переходом через нуль соответствует торможению обратного течения, остановке и разгону прямого течения после включения ГЦНА.



Р и с. 3. Расчетная (1, 3) и измеренная (2, 4) температура в холодных (1, 2) и горячих нитках (3, 4) соответственно

После подключения второй петли измеренная температура в холодной нитке уменьшилась на  $2,3\text{ }^{\circ}\text{C}$  за счет изменения направления тока теплоносителя и поступления в нее еще более холодного теплоносителя из трубочки парогенератора, затем увеличилась на  $3,1\text{ }^{\circ}\text{C}$  и стабилизировалась на уровне  $289,7\text{ }^{\circ}\text{C}$  (рис. 3). Расчетная температура в холодной нитке второй петли сначала снизилась на  $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ , затем увеличилась на  $4\text{ }^{\circ}\text{C}$  и стабилизировалась на уровне  $288,7\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Отличие расчетной от измеренной температуры холодных и горячих ниток остальных петель не превышает  $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Максимальный расчетный и измеренный средний подогрев теплоносителя в реакторе в ходе переходного процесса составил  $10,8$  и  $9,8\text{ }^{\circ}\text{C}$  соответственно, после установления устойчивой циркуляции теплоносителя подогрев совпадает и равен  $9,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ .



Р и с. 4. Расчетная (1) и измеренная мощность (2) парогенераторов

Мощность петель совпадает в пределах погрешности (рис. 4).

Сопоставление расчета и эксперимента показало удовлетворительную точность расчетной модели. Моделирование является достаточным с точки зрения расчета макропараметров реакторной установки. Эти результаты использованы для валидации программы. Программное средство ATHLET/BIPR-VVER аттестовано для проведения анализа безопасности ВВЭР.

В качестве основного вывода следует отметить целесообразность моделирования подобных испытаний для совершенствования трехмерных динамических программ, поскольку в испытаниях значительную роль играет несимметричность изменения параметров по петлям.

Поступила в Редакцию 27.06.19