

Анализ теплогидродинамики циркуляционных контуров с помощью кода БАГИРА

Калиниченко С.Д., Крошилин А.Е., Крошилин В.Е.

ГП ВНИИАЭС

Проектирование новых АЭС с реакторами повышенной безопасности на современном научно-техническом уровне, а также повышение эффективности и уровня безопасности эксплуатации уже работающих АЭС, приводят к необходимости создания более совершенных программ для численного моделирования поведения всех систем АЭС и, прежде всего, циркуляционного контура в различных стационарных, переходных и аварийных режимах.

Одним из главных (и, вместе с тем, одним из наиболее трудоемких) направлений создания современного теплогидравлического расчетного кода является переход к многомерным моделям течения. Опыт численных расчетов убедительно показал, что адекватное моделирование целого ряда существенных с точки зрения безопасности АЭС процессов в рамках одномерного приближения невозможно. Результаты проведенного численного анализа свидетельствуют, что трехмерные эффекты играют существенную роль в следующих режимах: изменение расхода теплоносителя в одной или нескольких петлях; работа энергоблока на неполном числе петель; нарушение условий теплоотвода со стороны второго контура; внесение положительной или отрицательной реактивности в ограниченный сектор активной зоны; отказ работы части систем аварийного охлаждения реактора; перегрев и разрушение АЗ в локальных областях.

В течение нескольких последних лет во ВНИИАЭС создавался трехмерный негомогенный неравновесный по скорости и температуре теплогидродинамический код исследовательского класса точности БАГИРА, позволяющий моделировать процессы, протекающие в реакторе и первом контуре реакторной установки на всех стадиях аварийных режимов (как с большими и малыми течами, так и динамических переходных процессов). Эффективная численная схема, заложенная в код, делает возможным проведение расчетов циркуляционных контуров АЭС в режиме реального времени. При этом для корпуса реактора и парогенераторов со стороны второго контура используется трех- и двухмерная нодализация, соответственно.

В ходе создания и совершенствования код БАГИРА прошел подробную верификацию на базе экспериментов на установках для исследования отдельных физических явлений, на интегральных стендах и на реальных АЭС. В частности,

многомерные эффекты исследовались на примере сопоставления расчетных и стационарных данных для характеристик течения в парогенераторе ВВЭР-1000 5-го блока Нововоронежской АЭС [1].

Одним из новых применений кода БАГИРА стало его использование в тренажерах для АЭС. Так в 2000 г. был разработан и успешно сдан заказчику аналитический тренажер для Билибинской АЭС, в котором теплогидравлика моделировалась при помощи кода БАГИРА. Однако ввиду конструкционных особенностей реактора ЭГП-6, установленного на БиАЭС, в тренажере использовалась одномерная версия кода. В настоящее время проходит заключительная стадия разработки полномасштабного тренажера для 2-го блока Калининской АЭС, где впервые в мировой практике создания тренажеров применена многомерная нодализация корпуса реактора и парогенераторов.

Для исследования адекватности моделирования тренажером реальной физической картины было проведено его тестирование на основе «Технического обоснования безопасности» (ТОБ) для 1-го и 2-го блоков Калининской АЭС (Арх. № А-58798, Нижний Новгород, 1994). Рассматривались следующие аварийные и переходные режимы работы АЭС (в скобках указано количество рассмотренных режимов):

- режимы с нарушением работы систем, влияющих на реактивность (2);
- режимы с нарушением расхода теплоносителя (2);
- режимы с нарушением условий охлаждения со стороны второго контура (2);
- режимы с разуплотнением второго контура (3);
- режимы с разуплотнением первого контура (1);
- нарушения во вспомогательных системах (2).

По всем указанным режимам получено согласие результатов расчета с данными ТОБ.

На этапе сдачи тренажера заказчику проводилось тестирование тренажера на основе согласованных с АЭС процедур тестирования (в скобках указано количество процедур, по которым проведено сопоставление расчетных и стационарных данных):

- Процедура планового останова энергоблока с номинальной нагрузки до состояния «холодный останов» (5);
- Переходные режимы (4);
- Отказы оборудования (91);
- Тест активной зоны (8).

По заключению представителя Калининской АЭС расчет правильно воспроизводит стационарные данные.

На рис. 1 и 2 в качестве примера мы приводим сопоставление некоторых расчетных и стационарных данных для одного из рассмотренных испытаний, связанного с закрытием

стопорных клапанов. Видно, что расчет с использованием кода БАГИРА в целом качественно правильно моделирует характерные для данного испытания физические процессы. Несмотря на некоторые отличия в поведении кривых, погрешности расчета находятся в пределах отклонений, допустимых для тренажерной модели.

В рамках совершенствования кода БАГИРА был разработан набор подпрограмм, позволяющих численно описывать процесс повторного залива. Характерной особенностью этого процесса является значительная задержка между моментами подачи охлаждающей воды в раскаленный канал и началом остывания последнего, обусловленная медленным по сравнению со скоростью потока продвижением фронта смачивания вдоль разогретого канала. Для проверки работоспособности модели повторного залива мы сопоставили результаты расчета зависимости от времени температуры стенки охлаждаемой трубы с экспериментальными данными [2].

Экспериментальная установка представляла собой вертикально расположенную обогреваемую трубу длиной 5 м, диаметром 10 мм и толщиной стенки 1 мм. Труба переходила в необогреваемый тяговый участок длиной 1 м, который не моделировался в рамках настоящего исследования. Теплоноситель (вода) подавался с фиксированным расходом в нижнюю часть трубы. Обогрев трубы осуществлялся путем пропускания по ней электрического тока. Мощность тепловыделения составляла 0.25 МВт/м^2 , расход теплоносителя – 2100 кг/с, давление в экспериментальной установке – 3 МПа.

В начальный момент времени срабатывал быстродействующий клапан, перекрывавший подачу охлаждающей воды в нижнюю часть экспериментальной установки. Через заданный интервал задержки (примерно 8 сек) клапан открывался, и теплоноситель начинал поступать в трубу с прежним расходом. Общая длительность эксперимента составила 90 сек. В ходе эксперимента проводились измерения температуры стенки трубы в различных ее сечениях.

Сопоставление некоторых данных расчета и эксперимента показано на рис. 3 и 4, где приведены зависимости от времени рассчитанной и измеренной температуры стенки трубы на высоте 4.233 м и 3.483 м от начала обогреваемого участка. Несмотря на присущие данному эксперименту значительные неопределенности в методике его проведения и погрешности экспериментальных данных, затруднившие расчетный анализ, разработанная модель повторного залива продемонстрировала хорошее качественное описание общей картины распространения фронта повторного смачивания. В то же время согласование экспериментального и расчетного значений скоростей фронта повторного залива, определяющих моменты начала резкого падения температуры стенок, можно считать очень хорошим даже на количественном уровне. Это, в свою очередь,

свидетельствует о возможности использования программного комплекса БАГИРА для моделирования процесса повторного залива при исследовании аварийных ситуаций на реальных энергетических установках, что еще больше расширяет сферу возможного применения данного программного комплекса.

Список литературы

- [1] Комплекс программ БАГИРА для моделирования теплогидродинамики многофазных сред /А.Н. Веселовский, А.Ф. Животягин, С.Д. Калиниченко и др.// Теплоэнергетика. №5. 1998. с. 11–16.
- [2] И.С. Дубровский и др. «Исследование аварийного разогрева и расхолаживания испарительных каналов». Вопросы безопасности АЭС и задачи научных исследований. Сборник докладов Всесоюзного научно-технического совещания. Полярные Зори, Кольская АЭС, июнь 1977. – М.: Атомиздат, 1979, стр.70–76.

Рисунки

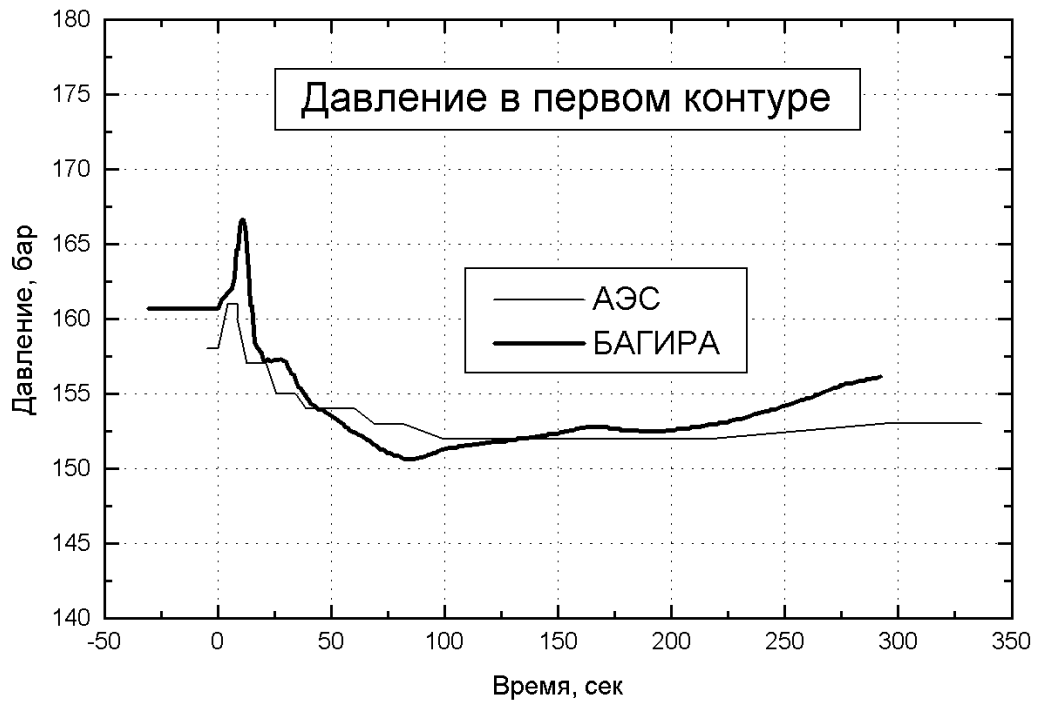


Рис. 1. Давление в первом контуре

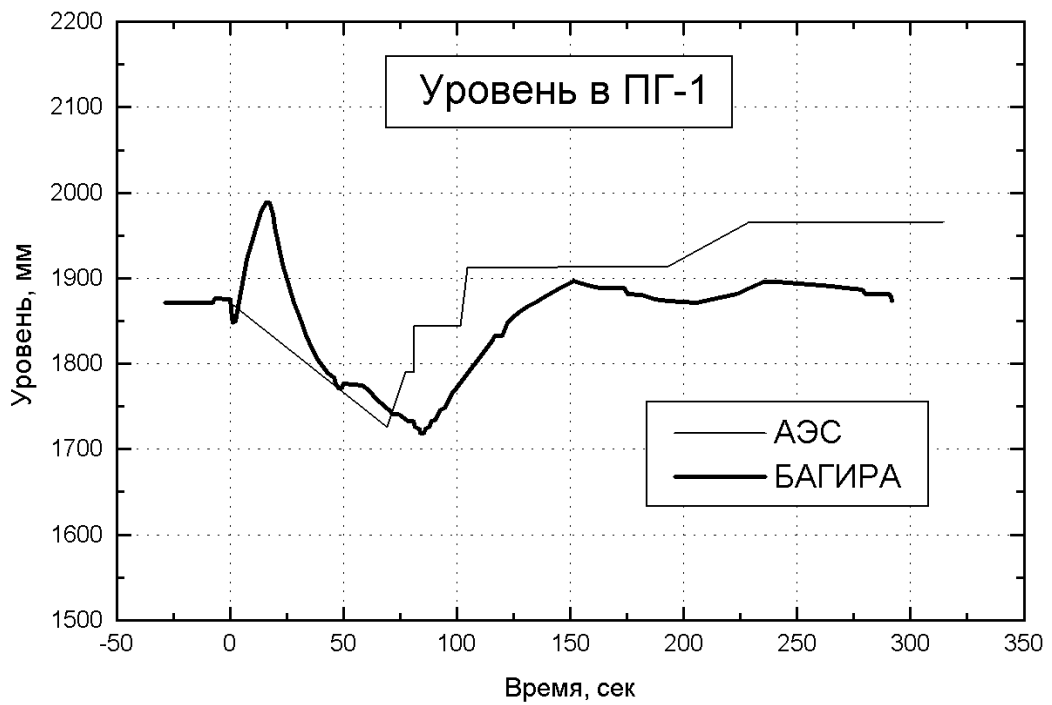


Рис. 2. Уровень теплоносителя в парогенераторе первой петли

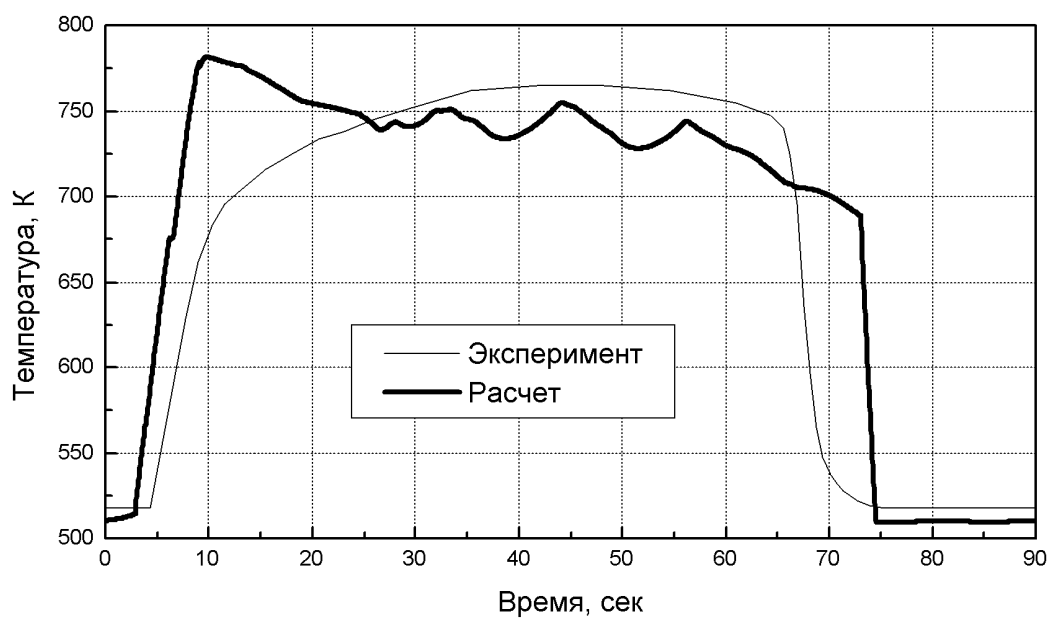


Рис. 3. Температура стенки на расстоянии 4.233 м от начала трубы

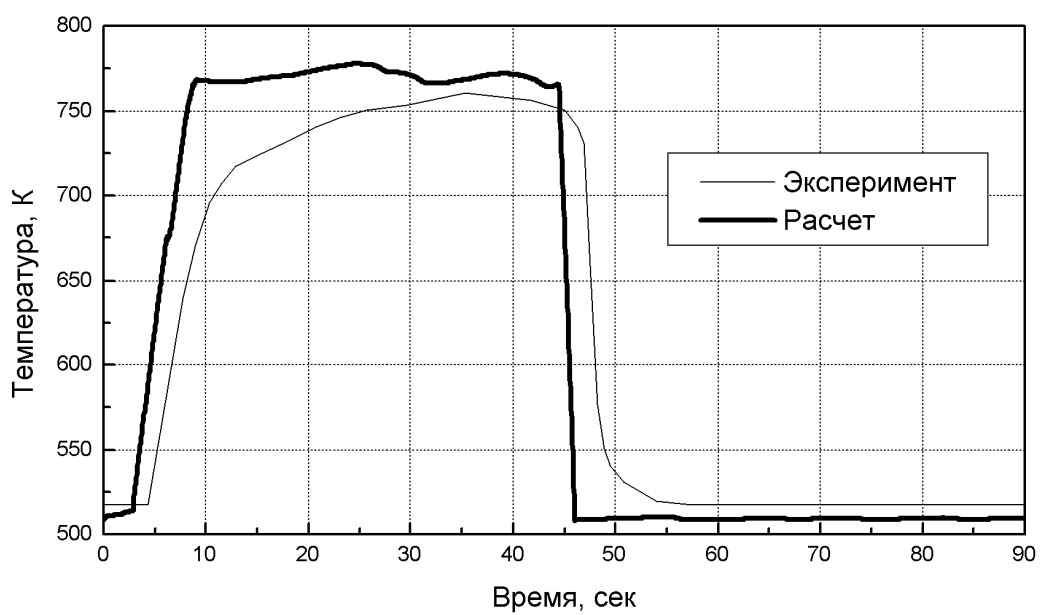


Рис. 4. Температура стенки на расстоянии 3.483 м от начала трубы