

ПРОГРАММНОЕ СРЕДСТВО ДЛЯ ВЫБОРА И ОБОСНОВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК РЕАКТОРНЫХ УСТАНОВОК ИНТЕГРАЛЬНОГО ТИПА

Еремеев Д.В., Мариничев Д.В. (АО «НИКИЭТ», Москва, Россия)

Введение

Разработка усовершенствованного программного средства (ПС) проводилась с использованием опыта создания и эксплуатации программы-прототипа ROSA [1]. Программное средство ROSA-M предназначается для разработки компьютерных моделей РУ интегрального типа. Такие компьютерные модели позволяют проводить расчетный анализ стационарных и переходных процессов в РУ, включая аварии, в том числе при анализе безопасности. Разработанные в ROSA-M компьютерные модели РУ помогают проводить выбор, оптимизацию и обоснование технических решений, принимаемых как при проектировании новых, так и при ремонте и модернизации эксплуатируемых реакторных установок.

Выполнено совершенствование вычислительных алгоритмов, направленное на увеличение быстродействия программного средства, которое позволяет сократить время, затрачиваемое пользователями на выполнение многовариантных расчетов с целью выбора основных характеристик РУ. Это совершенствование коснулось численной аппроксимации дифференциальных уравнений, использованных методов решения нелинейных алгебраических уравнений, методов решения системы линейных алгебраических уравнений, а также распараллеливания вычислений.

Улучшены способы задания и первичной программной обработки исходных данных, направленные на сокращение затрат времени пользователей при создании и корректировке компьютерных моделей РУ.

Проведена верификация ROSA-M для обоснования применимости программного средства к расчетному анализу РУ на следующих теплогидравлических процессах и явлениях:

- необратимых потерях давления на трение и дрейфе фаз при течении воды в каналах;
- гидроударах в контуре циркуляции;
- нестационарной теплопроводности в плоской и цилиндрической стенках;
- критических истечениях воды через сопловые ограничители расхода или относительно длинные каналы;
- опорожнениях сосудов высокого давления.

1. Основные модели потоков

В настоящий момент для разработки компьютерных моделей РУ с интегральными водо-водяными реакторами используются программные средства, в которых потоки воды и пара представляются с помощью равновесных, частично или полностью неравновесных термодинамических моделей. Для решения многих технических задач достаточно применение равновесных или частично неравновесных моделей потоков двухфазной смеси с дрейфом фаз. Использование в ROSA-M таких упрощенных моделей приводит к сокращению времени, затрачиваемому на единичный расчет, и позволяет рассчитывать длительные стадии аварийных процессов.

Рассмотрение многих вариантов технических решений и некоторых длительных физических процессов, несмотря на использование равновесных или частично неравновесных моделей, требует достаточно большого количества времени. Одной из причин таких обстоятельств является неоптимальность используемых в настоящий момент вычислительных алгоритмов. В то же время системы основных уравнений

и замыкающих соотношений, которые являются основой математических моделей физических процессов и явлений, обладают целым рядом характерных особенностей, позволяющих применять специальные распараллеленные вычислительные алгоритмы. Применение специальных вычислительных алгоритмов позволяют сократить время расчета.

Построение численной сетки для теплогидравлической части задачи и решение соответствующей системы линейных алгебраических уравнений проводится исходя из того, что гидравлическая схема может быть представлена в виде сетевой задачи. Гидравлическая сеть представляет собой совокупность каналов, соединяющихся своими концами в узлах. Канал – это линейная, направленная в пространстве структура, имеющая внутреннюю нодализацию. Каждая нодализационная точка внутри канала имеет две связи со смежными канальными точками слева и справа. Каждый канал сети имеет узел на входе и на выходе. Узлы сети служат для описания соединения различных каналов между собой. Узлы не имеют внутренней нодализации и являются точками сети, в которых соединяются каналы.

Дифференциальные уравнения математической модели аппроксимируются с помощью неявных численных схем. Полученная в результате численной аппроксимации система линейных алгебраических уравнений решается методом секущих. Для решения системы линейных алгебраических уравнений теплогидравлической сетевой задачи используется метод редуцирования. Суть этого метода заключается в том, что с помощью прогонки исключаются неизвестные внутри каналов, для которых блоки матрицы системы линейных алгебраических уравнений имеют трехдиагональный вид. В результате получается уменьшенная (редуцированная) система линейных алгебраических уравнений для узлов сети. Эта система уравнений может быть решена любым прямым методом. Наиболее целесообразными являются методы исключения с поиском главного элемента. Метод редуцирования, по сути, относится к прямым методам исключения, учитывает специфику решаемых задач и позволяет существенно сократить объем вычислений и хранимой информации.

1. Моделируемые процессы и явления

В программном средстве ROSA-M используются замыкающие соотношения для следующих основных физических процессов и явлений:

- необратимые потери давления на трение и местные сопротивления;
- теплообмен между потоком теплоносителя и стенками;
- дрейф фаз;
- кризис течения;
- энерговыделение в активной зоне, определяемое нейтронной кинетикой.

При расчете потерь давления на трение и теплообмена учитываются следующие случаи обтекания поверхностей:

- течение внутри прямых труб с круглой или другой формой проходного сечения;
- течение внутри кольцевых каналов;
- течение внутри изогнутых труб (змеевиков);
- продольное обтекание наружной поверхности сборок стержней (труб) с треугольной или квадратной упаковкой;
- поперечное обтекание наружной поверхности коридорного или шахматного пучка труб.

В расчете теплообмена рассматриваются следующие режимы:

- ламинарный, переходный и турбулентный режимы вынужденной конвекции, режим естественной конвекции, а также их совместное действие;

- пузырьковое кипение и испарение с поверхности жидкой пленки для кольцевого и дисперсно-кольцевого режимов течения;
- пленочное кипение для обращенного капельного режима течения, конвекция пара в дисперсно-капельном потоке и испарение с поверхности капель;
- конденсация пара.

Дрейф фаз рассчитывается для подъемных, опускающих и горизонтальных двухфазных потоков при различных режимах течения: пузырьковый, снарядный, кольцевой, дисперсно-кольцевой, обращенный кольцевой и дисперсно-капельный.

Мощность энерговыделений в активной зоне рассчитывается с помощью решения системы уравнений нейтронной кинетики, которые представлены в точечном приближении с шестью группами запаздывающих нейтронов. При определении мощности учитываются эффекты реактивности, связанные с изменением теплофизических параметров топлива, теплоносителя (замедлителя), а также с функционированием рабочих органов воздействия на реактивность. Остаточные энерговыделения, в зависимости от времени работы установки на заданном уровне мощности, рассчитываются с помощью предусмотренных в программе корреляций.

2. Теплогидравлические модели основного тепломеханического оборудования

В ROSA-M используются модели основного тепломеханического оборудования:

- парогенераторов с подвижными границами расчетных участков;
- отсечных клапанов;
- циркуляционных насосов;
- газовых компенсаторов объема с ресивером;
- парогазовых компенсаторов объема;
- органов воздействия на реактивность.

3. Пользовательская программа

Программное средство ROSA-M позволяет дополнять предусмотренные в программе модели процессов и явлений, а также модели работы оборудования пользовательскими зависимостями и алгоритмами, для чего предусмотрен соответствующий механизм в виде пользовательской программы. Пользовательская программа составляется на алгоритмическом языке высокого уровня LUA и исполняется основной программой как интерпретатор без перекомпиляции текста.

Входной язык пользовательской программы обеспечивает применение стандартных математических функций, однако зачастую для моделирования РУ требуется использовать специализированные функции, например, функции расчета теплофизических свойств воды и водяного пара или аммиака. С целью увеличения функциональных возможностей пользовательской программы расширен перечень специализированных функций, доступных для применения в пользовательской программе.

4. Графический интерфейс

С целью повышения удобства работы пользователя с программой был разработан новый графический интерфейс. Графический интерфейс реализован в Фортране с помощью использования библиотек IUP (рис. 1).

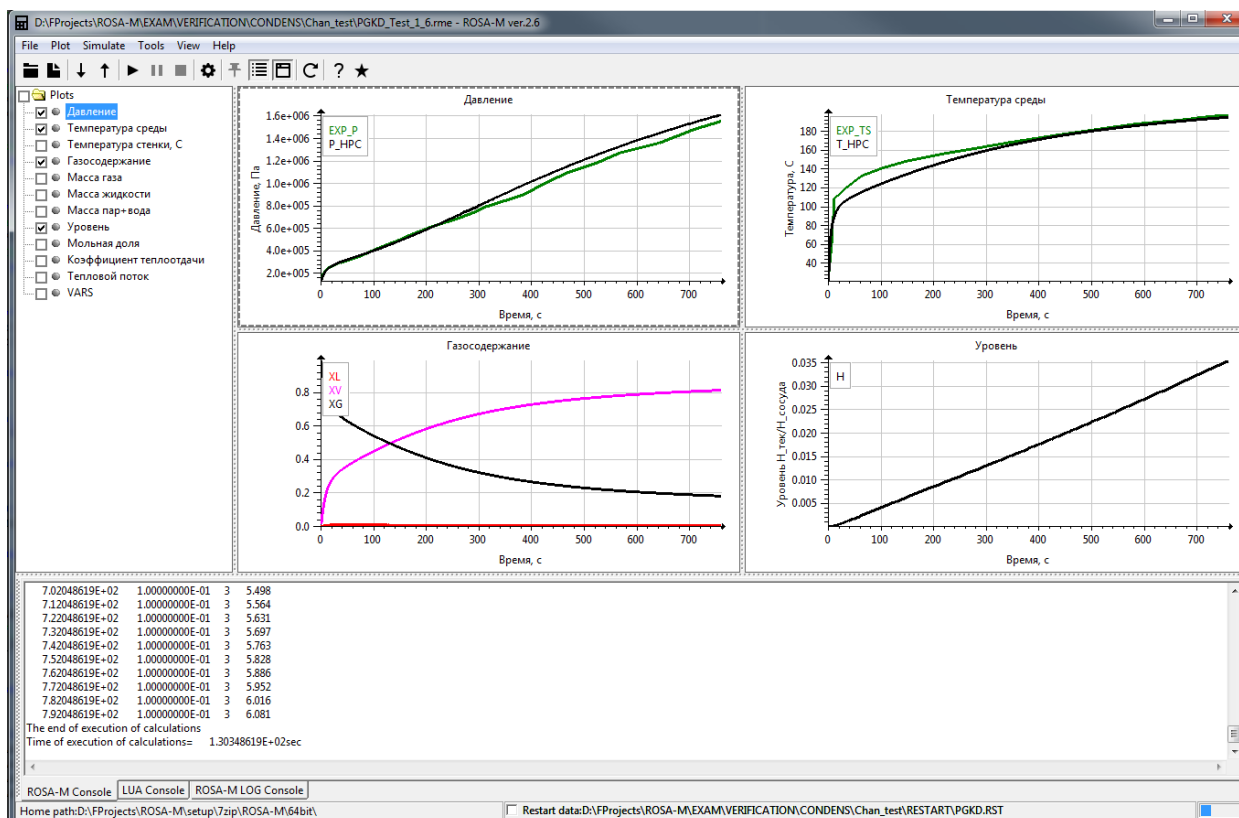


Рис. 1. Окно программы с несколькими выбранными для отображения графиками

Вывод результатов расчетов программа может осуществлять в графическом виде. Графики расчетных параметров, записанные программой после завершения работы в файлы графического типа, могут быть использованы не только при анализе результатов расчета, но и при разработке документации.

Внедрен модуль визуализации расчетной схемы и связи между графом расчетной схемы и файлом исходных данных. С помощью этого модуля программа строит граф расчетной схемы, на котором отображаются ее основные объекты. Граф расчетной схемы упрощает анализ топологии и сокращает время на создание и отладку модели конкретной РУ.

5. Верификация на отдельных явлениях и процессах

Выполнены тестовые расчеты усовершенствованной программы ROSA-M, которые были направлены на отладку программы, кросс-верификацию и начало работ по обоснованию применимости программы к моделированию режимов работы РУ с корпусными водо-водяными реакторами.

5.1. Необратимые потери давления на трение

Кросс-верификация модели расчета необратимых потерь давления на трение проведена с нормативным методом гидравлического расчета котельных агрегатов.

Рассчитано всего 3600 режимов для круглой трубы диаметром $d = 12$ мм в диапазонах: давлений $p = 2\text{--}20$ МПа, массовых скоростей $\rho w = 200\text{--}2000$ кг/(м²·с) и расходных объемных паросодержаний $\beta = 0\text{--}1$

Результаты распределения отношений отклонений расчетных значений от нормативных к расчетным представлены ниже.

Основные результаты кросс-верификационных расчетов необратимых потерь давления

Среднее отклонение, %	0,283
Стандарт отклонений, %	7,48
Коэффициент корреляции расчетных и экспериментальных данных	0,986

5.2. Дрейф фаз

Кросс-верификация моделей расчета истинного объемного паросодержания при подъемном движении насыщенного теплоносителя в адиабатных вертикальных каналах проводилась на эмпирических зависимостях Миропольского З.Л. и Лабунцова Д.А. Расчетные эмпирические зависимости использовались в рекомендованном авторами диапазоне. Рассчитано всего 3600 режимов для круглой трубы диаметром $d = 12$ мм в диапазонах: давлений $p = 2\text{--}20$ МПа, массовых скоростей $\rho w = 200\text{--}2000$ кг/(м²·с) и расходных объемных паросодержаний $\beta = 0\text{--}1$. Результаты кросс-верификации приведены ниже.

Основные результаты кросс-верификационных расчетов истинного объемного паросодержания для адиабатных потоков

Среднее отклонение, %	3,067
Стандарт отклонений, %	3,232
Коэффициент корреляции расчетных и экспериментальных данных	0,996

Модель расчета истинного объемного паросодержания для парогенерирующих труб верифицировалась на экспериментальных данных Бартоломея Г.Г., Брантова В.Г., Съботинова Л.С., Абрамяна А.А., Агафоновой Е.С., Лабунцова Д.А., Кольчугина Б.А., Захаровой Э.А. и др. Примеры расчетов распределения истинного объемного паросодержания по длине трубы для условий подачи недогретой воды на входе приведены на рис. 2. График сравнения расчетных истинных объемных паросодержаний с 8374 экспериментальными точками приведен на рис. 3.

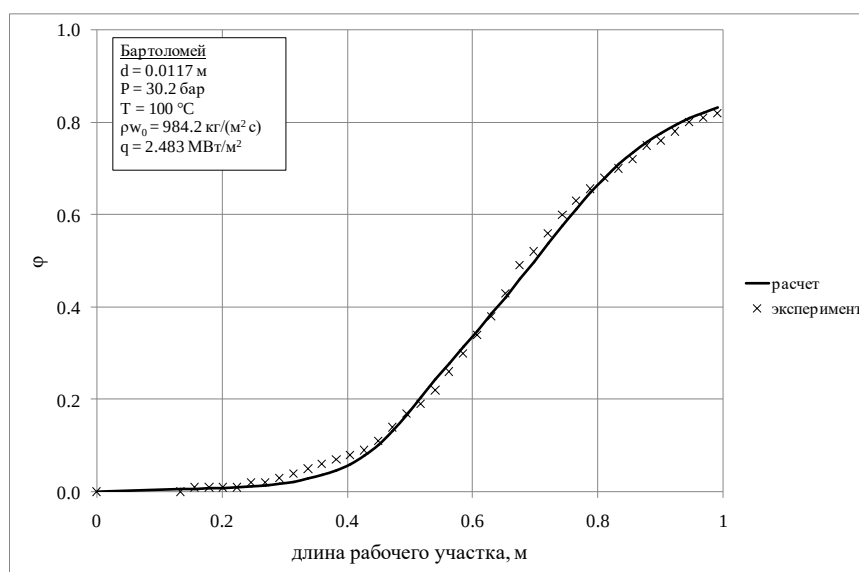


Рис. 2. Пример расчета истинного объемного паросодержания для парогенерирующей трубы

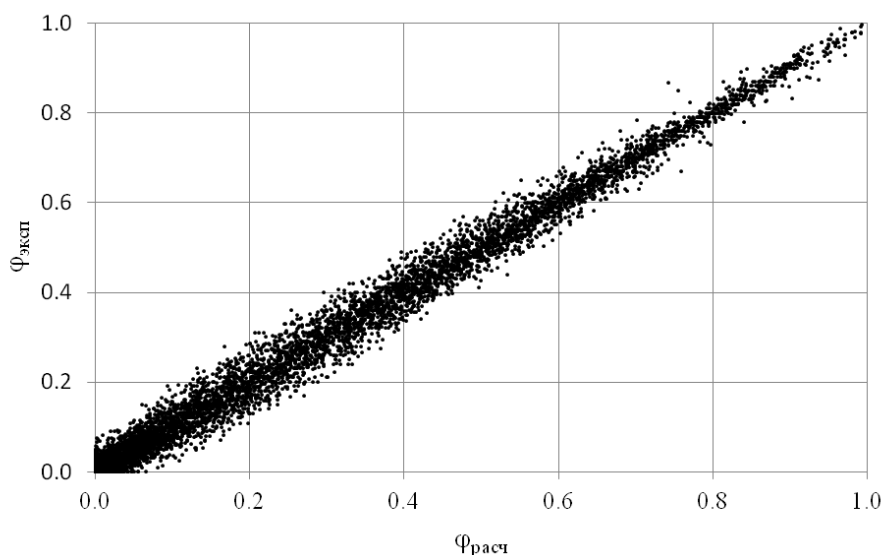


Рис. 3. Сравнение расчетных и экспериментальных значений истинного объемного паросодержания для обогреваемых каналов

5.3. Гидроудар в прямом канале

С целью обоснования адекватности отражения законов сохранения энергии, массы и импульса была рассмотрена задача о гидроударе, для которой имеются аналитические данные по максимальной амплитуде и периоду колебаний давления. Проведен расчет гидроудара в результате мгновенного останова расхода в прямом длинном трубопроводе без местных сопротивлений. Сравнение результатов расчета по ПС ROSA-M и аналитического решения задачи показало хорошее совпадение результатов. Это позволяет сделать вывод о том, что в ПС ROSA-M адекватно отражены законы сохранения энергии, массы и импульса.

Расчетная схема представлена на рис. 4. Трубопровод длиной 1000 м моделировался одним гидравлическим каналом. Первый и последний объемы канала, не входящие в упомянутый выше тысячеметровый участок, задают граничные условия по давлению и рассчитываемыми не являются. На последней канальной связи между предпоследним и последним объемами канала расположен клапан, закрывающийся за 1 шаг интегрирования по времени. Принято, что клапан закрывается спустя 1 секунду после начала процесса.

Результаты расчета изменения давления приведены на рис. 5 и ниже списком.

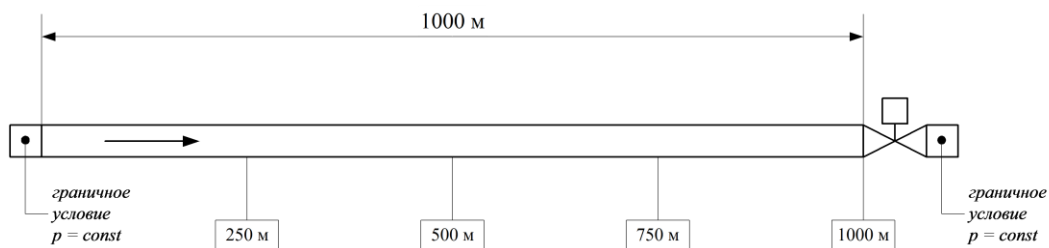


Рис. 4. Расчетная схема для решения задачи о гидроударе

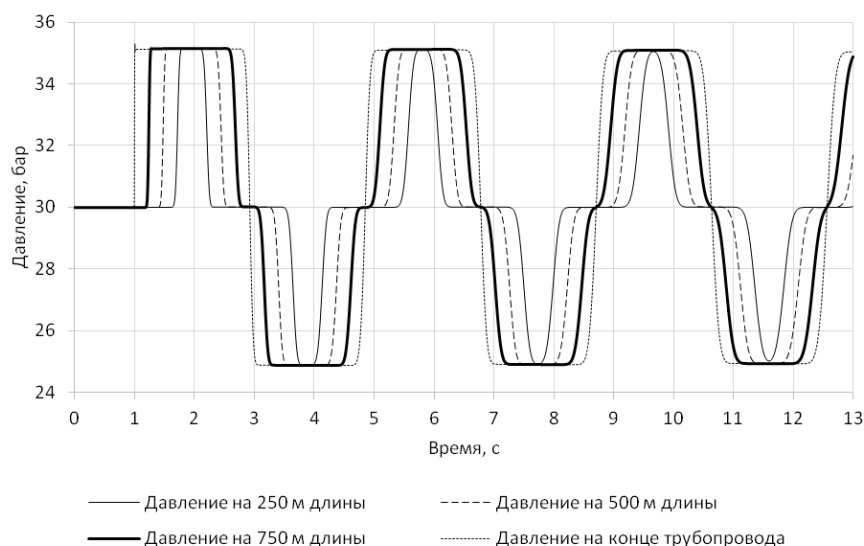


Рис. 5. Результаты расчета изменения давления при гидроударе в прямом гладком трубопроводе

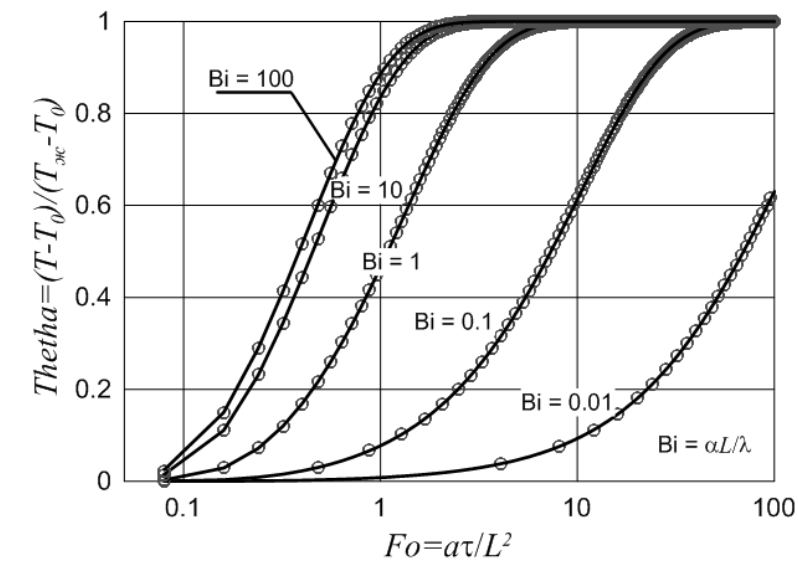
Результаты расчета изменения давления при гидроударе

Теоретическое значение максимальной амплитуды изменения давления, бар	5,14550
Рассчитанное значение максимальной амплитуды изменения давления, бар	5,14174
Теоретическое значение периода колебаний, с	3,846
Рассчитанное значение периода колебаний, с	3,852

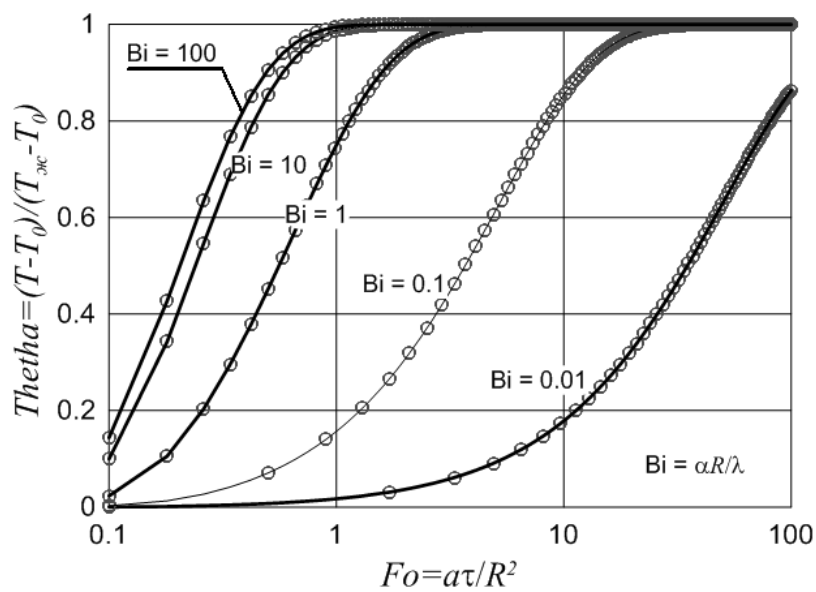
Сравнение теоретических и расчетных значений позволяет говорить об адекватности отражения законов сохранения энергии, массы и импульса.

5.4. Нестационарная теплопроводность в стенке

Верификация модели теплопроводности проведена на аналитических решениях для бесконечных пластины и цилиндра без внутренних источников тепла с граничными условиям III рода на внешних поверхностях. Результаты верификации для безразмерных температуры Θ и времени Fo при различных критериях Био Bi приведены на рис. 6.



а)



б)

Рис.6. Результаты верификации модели теплопроводности:

а) пластина, температура на адиабатной поверхности; б) цилиндр, температура на оси;

○ – аналитическое решение, — – ROSA-M;

T_0 – начальная температура, $T_{ж}$ – температура жидкости, α – коэффициент теплоотдачи,
 a – коэффициент температуропроводности, τ – время, L – толщина пластины,
 R – радиус цилиндра

5.5. Критическое истечение

Качество расчета критического истечения важно для моделирования аварийных ситуаций, связанных с разгерметизацией контуров РУ, качество расчета критического истечения определяет корректный расчет выхода массы и энергии во времени из аварийного контура РУ и в первую очередь важно при обосновании ядерной и радиационной безопасности РУ.

С целью проверки качества расчета критического истечения были использованы данные Фисенко. Результаты расчета критического истечения по ПС ROSA-M приведены на рис. 7.

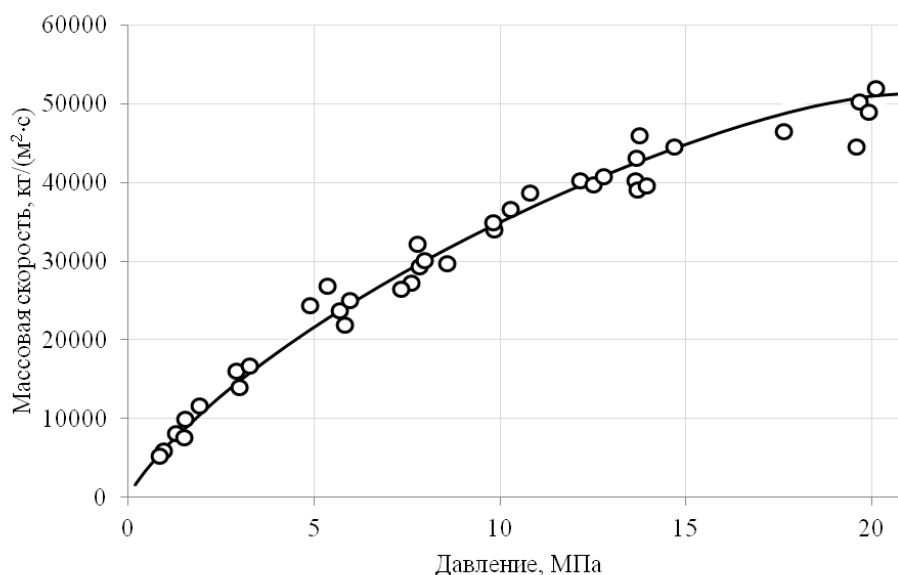


Рис. 7. Результаты расчета критического истечения:
 ○ – экспериментальные данные; линия – расчет по ПС ROSA-M

5.6. Опорожнение сосудов высокого давления

Выполнено сопоставление расчетных и экспериментальных данных для переходных процессов опорожнения сосудов высокого давления. В рассматриваемых экспериментах сосуды первоначально содержали пар и воду, образующую уровень. Вода и пар перед началом опорожнения находились в состоянии термодинамического равновесия. Истечение осуществлялось через сопловые насадки различного диаметра как из зоны с преобладанием водяной фазы, так и из зоны с преобладанием паровой фазы.

Рассмотрены два эксперимента: первый – с истечением из нижней части сосуда, второй – с истечением из паровой области, расположенной выше первоначального положения уровня воды. Кроме прочего, в этих экспериментах сосуды различались объемом (геометрическими характеристиками) и диаметром соплового устройства истечения.

Расчетные схемы включали в себя вертикальный сосуд с внутренней нодализацией, патрубок истечения и клапан, открывающийся перед началом переходного процесса. Место подсоединения патрубка истечения к сосуду в расчетной схеме соответствовало экспериментам, а именно: патрубок подсоединялся либо в нижней части сосуда, либо в зоне, расположенной выше первоначального положения уровня воды.

Примеры результатов расчетов по частично неравновесной модели и их сопоставления с экспериментальными данными показаны на рис. 8 и 9. На рисунке 8 отображено опорожнение сосуда при истечении из его нижней части, а на рисунке 9 – при истечении из паровой области.

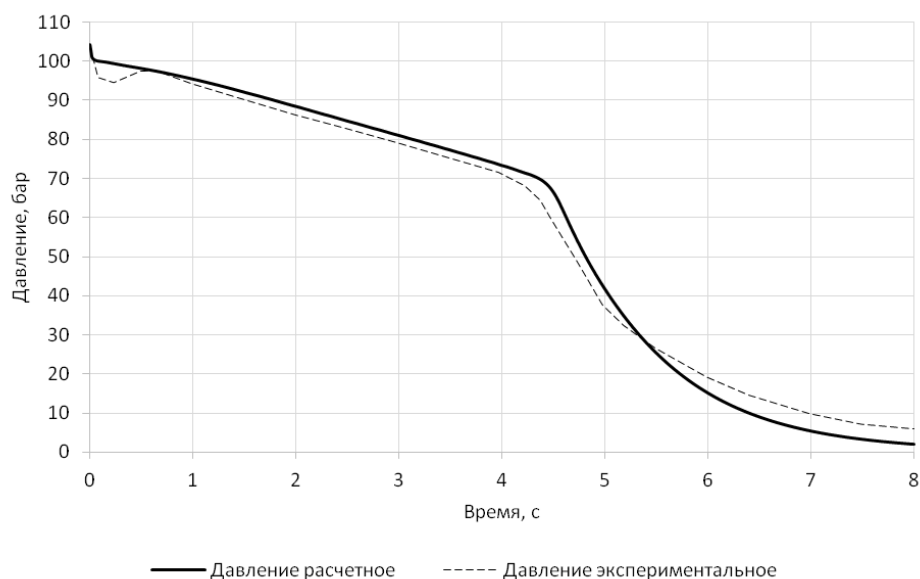


Рис. 8. Опорожнение сосуда высокого давления при истечении из водяной области

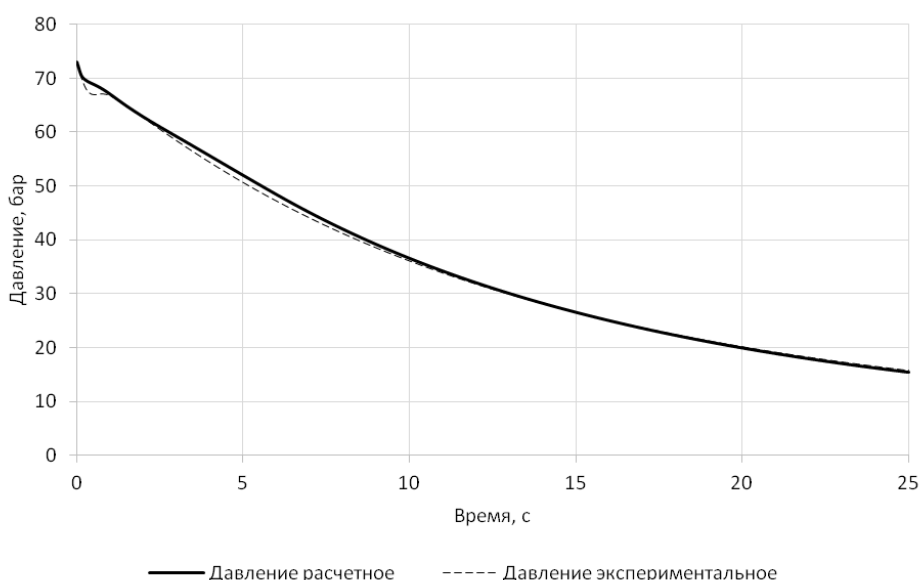


Рис. 9. Опорожнение сосуда высокого давления при истечении из паровой области

Сравнение расчетных и экспериментальных данных показывает на удовлетворительное совпадение характера и темпа изменения давления между собой. Результаты расчета свидетельствуют об адекватности отражения законов сохранения массы и энергии, а также замыкающих соотношениях по кризису истечения в ПС ROSA-M.

6. Верификация на результатах испытаний действующей ППУ

При верификации ПС ROSA-M рассмотрены маневры паропроизводительностью, переход с принудительной циркуляции (ПЦ) на естественную циркуляцию (ЕЦ) и расхолаживание с помощью системы аварийного расхолаживания (САР) после срабатывания аварийной защиты (АЗ). Примеры верификационных расчетов показаны на рис. 10–12. На этих рисунках использованы следующие обозначения: T1 и T2 – относительные температуры соответственно на выходе и входе активной зоны реактора,

P – относительное давление первого контура, n – относительная мощность реактора; кружки – эксперимент, линии – расчет.

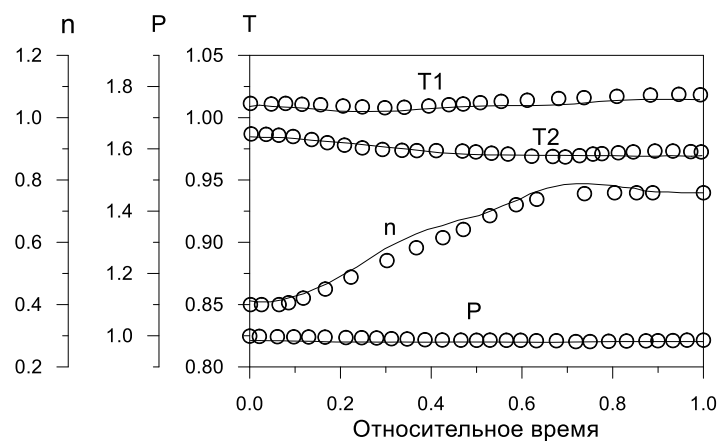


Рис. 10. Маневр паропроизводительностью с 40 до 75 %

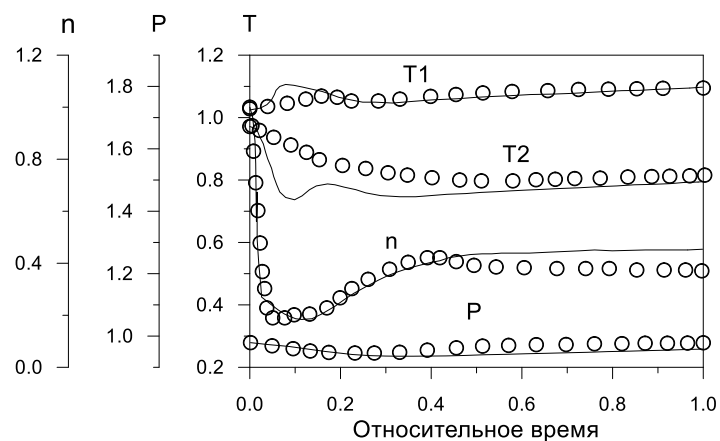


Рис. 11. Переход с ПЦ на ЕЦ

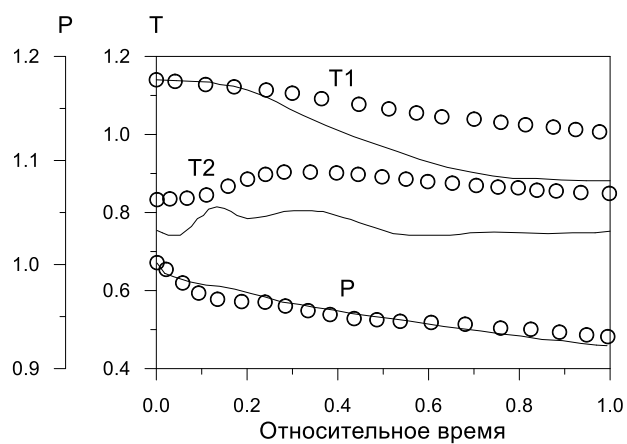


Рис. 12. Расхолаживание средствами САР после работы первого контура на ЕЦ и срабатывания АЗ

Заключение

Результаты верификационных расчетов в ПС ROSA-M позволяют сделать вывод, что разработанные математические модели и используемые замыкающие соотношения адекватно отражают физические процессы и явления, характерные для РУ с водо-водяными реакторами интегрального типа.

Список литературы

1. Обоснование применимости компьютерного кода ROSA для расчетного анализа установок с водо-водяными реакторами интегрального типа / А.И. Алексеев, Д.В. Еремеев, М.Ю. Иванов, В.К. Кондаков, А.В. Мухин // НИКИЭТ. Годовой отчет – 2006, – М., 2006. С. 113–116.