

РАЗРАБОТКА ТЕПЛОГИДРАВЛИЧЕСКОГО КОДА КАНАЛ И ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ТРЕНАЖЕРОВ АС

А.А. Казанцев

ЭНИМЦ «Моделирующие системы»



Для обеспечения разработки тренажеров АС выполнен цикл теплофизических и термодинамических работ, создан ряд моделей основного оборудования АС, разработан двухфазный полностью неравновесный код КАНАЛ, основанный на модели из шести уравнений в термодинамически неравновесном приближении. В коде применены новая карта режимов течения и отечественные замыкающие соотношения для кипения и конденсации внутри труб, отличающиеся от известных кодов-рототипов, таких как TRAC. Для проверки системы замыкающих соотношений при изучении кода TRAC, выбранного в качестве прототипа, были выполнены нестационарные 3D-расчеты ряда задач, в том числе расчеты горизонтальных парогенераторов, проведено сравнение расчетов с экспериментом на модели верхней четверти трубного пучка парогенератора.

ВВЕДЕНИЕ

Чем быстрее работает расчетная математическая модель, тем легче и в более широком диапазоне она может быть протестирована и тем более надежны результаты, полученные с ее помощью. В настоящее время многие теплофизические модели можно использовать как модели реального времени, а не только как прецизионные модели или модели для кодов лучшей оценки.

Наиболее важно иметь модели реального времени в тренажерах. Исторически тренажерные технологии возникли и получили наибольшее развитие там, где ошибки при обучении на реальных объектах могут привести к чрезвычайным последствиям, а их устранение – к большим финансовым затратам. Отечественные разработки в области создания тренажеров для атомных электростанций в течение нескольких десятков лет существенно уступали зарубежным. Одной из главных причин отсутствия полномасштабных тренажеров являлось отсутствие соответствующих отечественных математических моделей реального времени, прежде всего, теплофизических моделей для оборудования реакторного и турбинного отделений.

Модернизация действующих и разработка новых тренажеров для ЯЭУ, отвечающих повышенным требованиям к скорости расчета, невозможна без создания моделей основного оборудования и двухфазной контурной модели. В последнее время к этому списку добавилась возможность выполнения пространственного моделирования двухфазных нестационарных задач для внутрикорпусного про-

странства ПГ, компенсатора объема, контейнента, корпуса реактора. Необходимость выполнять для этих элементов оборудования пространственные расчеты была показана в результате исследования, выполненного во ВНИИАЭС.

Модели реального времени расчета являются дидактическими обучающими программами, в которых требование высокой скорости расчета противоречит традиционным требованиям максимально возможных точности и полноты постановки задачи. При этом возможность упрощения моделей для получения быстрых моделей весьма ограничена, поскольку неполнота или недостоверность моделей приводят к возникновению проблемы привития «отрицательного навыка» у обучаемого. Другим основным требованием к моделям является всережимность. Под этим понимается не только работоспособность в широком диапазоне технологических параметров, но и, прежде всего, устойчивость работы кода при любых входных параметрах, включая аварийные режимы работы. Требование устойчивости возникает вследствие ограниченности времени учебного процесса, поскольку повторный запуск тренажера является длительной процедурой и приводит к уменьшению объема освоенного материала, отнимает время непосредственно от учебы. Тренажеры проектируются в соответствии с нормативными документами отрасли, в которых определяются требования к точности моделей в основных и переходных режимах [9].

Все эти требования должны сопровождаться постоянным анализом адекватности расчетных моделей физической природе явлений и процессов.

МОДЕЛИ ОСНОВНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Автор решал задачу по обеспечению разработки тренажеров АС всеми необходимыми учебному процессу теплофизическими моделями в рамках основного оборудования реакторного и турбинного отделений реакторов ВВЭР-440, ВВЭР-1000 и БН-600. В течение ряда лет в зависимости от потребностей практики и выполняемых фирмой ЭНИМЦ «МС» контрактов был разработан набор теплофизических моделей. Некоторые из наиболее интересных результатов опубликованы в печати, часть существует в отчетах ЭНИМЦ «МС».

Разработанный комплекс из ряда моделей для реакторного и турбинного отделений включает в себя

- модель конденсатора [1] с учетом влияния воздуха на теплообмен в широком диапазоне концентрации воздуха (от практического отсутствия до атмосферного давления для режима срыва вакуума); при этом использованы современные корреляции для расчета конденсаторов из монографии [10], а также поправки на термодинамическую неравновесность;
- динамическую модель трубного пучка [3], в линейной или двумерной постановке учитывающую значительный осевой перенос тепла по металлу трубы, что важно в парогенераторах БН-600;
- быструю динамическую модель бака [12], использующуюся совместно с моделью трубного пучка [3] как нестационарная двухфазная модель подогревателей ПНД и ПВД;
- модель проточной части турбины с расчетом планов скоростей ступеней турбины в динамике, выполненную на базе системы трех законов сохранения: массы (с учетом отборов и сепарации влаги); энергии (с учетом отбора от потока технической работы турбины, получаемой из формул для всех планов скоростей и лопаточного КПД); импульса (с учетом переменного сопротивления ступени при переменных режимах работы турбины); для поиска и задания параметров используется предварительный теплогидравлический расчет проточной части турбины

на основе методики расчета проточной части [11], в которой требуется задание установочных углов лопаток СА и РК;

- модель эжектора на основе модификации проектной методики расчета, изложенной в [13].

Набор основных моделей определяется требованиями учебного плана и используемыми при обучении технологическими схемами АС. Все выполненные работы объединяет один общий подход – это преимущественно всережимные модели, работающие в реальном времени, с повышенной устойчивостью или логической защитой от отклонений входных параметров за разумные пределы. Модели работают на больших временных шагах – от 0,25 до 2 и более секунд, поэтому некоторые из моделей для обеспечения устойчивости делают несколько внутренних итераций или малых шагов.

СОЗДАНИЕ ДВУХФАЗНОГО НЕРАВНОВЕСНОГО КОДА КАНАЛ

Самостоятельное создание двухфазного кода «с самого начала» требует трудозатрат порядка 60 докторо-лет – такова по оценкам экспертов МЭИ (кафедра ИТФ) трудоемкость кода TRAC. Такую работу в одиночку невозможно выполнить в принципе. В [14] указывается, что «решение задачи создания мощного программного комплекса по типу TRAC или RELAP5 с расширенными возможностями учета пространственного распределения параметров потока и температурных полей греющих поверхностей во всех элементах исследуемого контура явно превышает творческие и физические возможности любого исследователя». Эта оценка подтверждается тем фактом, что подобного кода в стране до сих пор не было создано, несмотря на наличие ряда прекрасных отечественных разработок кодов различных авторов. Вследствие значительной трудоемкости всей работы в целом каждый отдельный отечественный код остается «полуфабрикатом» и значительно уступает зарубежным кодам лучшей оценки, выполненным силами отраслей развитых стран с хорошим разделением труда и значительным финансированием. Такую задачу можно решить только отраслью в целом, особенно в части экспериментального обоснования кода.

В России отечественным кодом в ядерной отрасли является код Корсар [15]. На сегодняшний момент, с теплофизической точки зрения, он является наиболее проработанным и тестирован на массиве из миллионов экспериментальных данных отрасли. Выполненные в ГНЦ РФ-ФЭИ тестовые расчеты показали, что скорость расчета этого отраслевого кода значительно ниже скорости кода TRAC [16] для ряда тестов и заметно ниже реального времени, т.е. в настоящее время он не может использоваться в тренажерах.

Развитие кода КАНАЛ проходило несколько этапов. Была продемонстрирована возможность кода лучшей оценки TRAC [16] рассчитывать номинальные и большинство аварийных процессов быстрее реального времени. Затем на основе анализа замыкающих соотношений и тестирования верифицирована пригодность системы замыкающих соотношений и теплофизических свойств кода к расчету отечественных установок, проведена замена устаревших корреляций. Дальнейшая работа выполнялась для программного комплекса на основе кода КАНАЛ, включая работу совместно с другими моделями, разработку пре- и постпроцессора.

Теплогидравлические расчеты проводятся на базе нестационарного полностью неравновесного приближения на основе шести уравнений сохранения. Дополнительно рассчитывается перенос борной кислоты и неконденсируемого газа. Система уравнений кода повторяет систему уравнений кода TRAC и опубликована в работе [23].

Код КАНАЛ разрабатывается на базе системы уравнений сохранения кода TRAC и конечно-разностной численной схемы SETS [17]. В ходе разработки кода эта численная схема была переработана для ускорения кода. Для решения разреженных систем линейных уравнений использовался пакет с открытым исходным кодом superLU [18].

Для того, чтобы разрабатывать код в области атомной энергетики, автору пришлось изучать основные коды лучшей оценки – Relap5 [22] и TRAC [16]. Были выполнены совместные нестационарные прецизионные 3D-расчеты с лабораторией контурной теплогидравлики ГНЦ РФ-ФЭИ (имеющей лицензионные версии кодов). Результаты некоторых из этих расчетных исследований представлены в [19, 20].

Необходимо было изучить и проанализировать возможности самого быстрого из имеющихся в распоряжении кодов и систему замыкающих соотношений кода – прототипа TRAC. Наиболее важными из замыкающих соотношений для расчета парогенераторов являются модель трения двухфазного потока при внешнем обтекании пучка труб ПГ, модель теплообмена при пузырьковом режиме кипения, модель межфазного трения жидкость – парогазовая смесь, замыкающие соотношения при кипении и конденсации в трубках.

Для моделей реального времени важнейшим критерием (кроме приемлемой точности) является скорость счета кода – интегральная характеристика, зависящая от качества используемой численной схемы, сшивки замыкающих соотношений на границах, используемой версии карты режимов двухфазных потоков, исключения областей теплофизических свойств с неустойчивостью (в районе критической точки) и отлаженностью кода в целом. Была поставлена задача сравнения скорости работы нескольких кодов на одном и том же тесте.

Тестирование проводилось среди лицензированных в области атомной энергетики американских кодов Relap5/mod3.2 [22], TRAC 5.14 [16] (далее просто TRAC) и победившего в конкурсе кодов и прошедшего верификацию российского кода Корсар [15] (НИИ г. Сосновый Бор). Версия кода была получена лабораторией контурной теплогидравлики ГНЦ РФ-ФЭИ (г. Обнинск) для сравнения уникальных экспериментальных данных ГНЦ РФ-ФЭИ при проведении верификации.

Для выполнения теста была организована творческая инициативная группа, взята одна из тестовых верификационных задач кода Корсар и для нее подготовлены файлы исходных данных для двух других сравниваемых кодов. Тестирование проводилось В.В. Сергеевым (ГНЦ РФ-ФЭИ, лаборатория контурной теплогидравлики) на версии кода TRAC, переведенной с оригинальной операционной системы (ОС) UNIX под ОС Windows В.В. Евстифеевым (системный администратор в ГНЦ РФ-ФЭИ). Размер сетки во всех тестах был одинаковым, также все условия однозначности были одинаковы. Решалась нестационарная задача, имевшая одинаковое физическое время процесса, результаты сравнивались между собой и с экспериментальными данными.

В качестве тестовой рассматривалась задача кипения воды в круглой трубе из нержавеющей стали с электрообогревом. На входе в трубку подавалась вода с температурой ниже линии насыщения, а на выходе получался перегретый пар. Сначала рассчитывался однофазный чисто гидродинамический тест, затем – тест при электрообогреве трубы. Сравнивались графики коэффициента скольжения фаз (отношение скорости пара к скорости воды) в зависимости от истинного объемного паросодержания, полученные разными кодами во всем интервале значений. Расчет по кодам TRAC и RELAP5 выполнялся для трубы при $\rho_w = 300 \text{ кг/м}^3$, $D = 2 \text{ мм}$, $P = 6 \text{ МПа}$, с электрообогревом стенки.

Самым быстрым оказался код TRAC. Решение заняло несколько сотых секунды, что позволило сделать заключение о возможности использования кода в тренажерах при расчете в номинальных и аварийных режимах. Следует отметить, что скорость расчета чисто гидродинамического теста была значительно выше – на несколько порядков быстрее, чем использовавшийся полный тест, оценивающий скорость работы кода в аварийных режимах и при малой течи.

При выполнении теста с использованием кода Корсар время счета оказалось самым большим. Версия кода, имевшаяся в распоряжении во время тестов, не смогла показать «реального» времени счета и уступила всем остальным кодам. Следует отметить, что система замыкающих соотношений этого кода верифицирована на нескольких миллионах экспериментов и является наиболее точной из всех трех рассматриваемых кодов. Объяснение этого, вероятно, следует искать в использовании устаревшей численной схемы (взятой от RELAP старой версии).

В целом получен вывод, что из трех доступных для тестирования кодов только код TRAC успешно прошел тестирование на возможность расчета в реальном времени. Дальнейшая разработка быстрого кода КАНАЛ проводилась на базе прототипа – кода TRAC.

Далее проводилась проверка способности расчета в реальном времени кода на реальных тренажерных нодализационных схемах.

Был рассмотрен расчет течи в гермозону ВВЭР-440. Для этого код КАНАЛ работал совместно с кодом SIMCO (тренажерной версией верифицированного ГАН кода KUPOI, ГНЦ РФ ФЭИ г. Обнинск). Эти коды работали совместно и продемонстрировали возможность получения реального времени счета для комплекса двух программ с одной течью типа LOCA. После этого проведена работа по включению кода КАНАЛ в тренажер.

Следует отметить, что на современном двухъядерном компьютере (Пентиум Е6700 Core) большая течь считается всего в три раза медленнее реального времени, хотя расчетный шаг при расчете гильотинного разрыва при аварии LOCA падает в 10000 раз.

В составе тренажера ВВЭР-440 код принимает или передает свыше 600 параметров и при этом комплекс работает в реальном времени в номинальном режиме и большинстве аварийных режимов. Этот большой объем передаваемых и принимаемых параметров между моделью и базой данных всего тренажера выполняется через сервер тренажера в рамках идеологии клиент-сервер.

На следующем этапе была разработана нодализационная схема парогенератора БН-600 и показана возможность ее расчета в реальном времени для этого парогенератора. Турбинное отделение БН-600 имеет 3 турбины, по числу петель, каждая из которых требует моделирования всех 24 модулей парогенератора. Код позволяет выполнять весь этот объем вычислений в реальном времени. Эта задача могла выполняться только на коде КАНАЛ, поскольку в нем имеются термодинамические свойства в требуемом интервале температур около 600°C (это значительно выше верхней температурной границы кода TRAC).

Чем отличается код КАНАЛ (разработанный на базе кода TRAC) от своего предшественника? Во-первых, изменены свойства и ряд замыкающих соотношений, во-вторых, код может работать совместно с другими моделями и приложениями и под их контролем.

Следующий блок из двух тестов проверял возможность работы кода уже не на простой трубе, а на сложных нодализационных схемах реальных тренажеров.

Пришлось менять термодинамические свойства. Выполненные тесты на парогенераторах БН-600 выявили проблему с ограниченностью диапазона свойств,

которую удалось решить. Результатом работы стало математическое описание всех измененных функций и их коэффициентов, а также графики сравнения их с табличными данными. Актуальность работы обусловлена тем, что для использования в составе тренажера БН-600 код необходимо было научить работать в диапазоне более высоких температур, вплоть до 590°C, в котором функционирует обычная энергетика. Для атомной энергетики на водо-водяных реакторах коду было вполне достаточно иметь верхнюю границу 440°C. Код предназначался для обоснования безопасности установок на базе реакторов ВВЭР и ВК (код разрабатывался под их западные аналоги – реакторы PWR и BWR). Для реакторов с жидкометаллическим теплоносителем этот диапазон оказался недостаточным. Для изменения свойств в общей сложности изменен текст около 70 файлов (10% программ кода-прототипа).

Следует также отметить, что для парогенератора БН-600 очень важным оказалось умение кода работать с двухжидкостной полностью неравновесной моделью среды, поскольку температуры жидкой и паровой фаз на выходе из испарителя отличаются на несколько десятков градусов. Это отличие оператор БЩУ видит как показание серии датчиков температуры, расположенных вдоль тракта течения пароводяной смеси. Гомогенная модель дает сильное отличие от наблюдаемых температур, что было продемонстрировано специальными тестовыми расчетами. При этом расчетные температуры по гомогенной модели и негомогенной неравновесной модели сравнивались с показаниями датчиков температуры на трубопроводах. Следует отметить, что неравновесная модель позволила корректно предсказывать изменение показаний датчиков для такого сложного неравновесного течения.

Следующей группой изменений, внесенный в алгоритм оригинального кода, было несколько замен теплофизических формул с западных на проверенные отечественные. Эти изменения проводятся регулярно разными авторами, и можно указать в литературе ряд аналогичных выполненных доказательств необходимости проведения таких замен и примеров их успешного выполнения, проведенных для получения совпадения с экспериментальными данными. Мной, во-первых, среди замыкающих соотношений была применена формула Д.А. Лабунцова вместо формулы Чена для пузырькового кипения; во-вторых, использовалась формула Бойко-Кружилина для кипения внутри труб вместо соответствующей формулы кода. Каждое из этих изменений было выполнено после тщательного тестирования и после сравнения с экспериментальными данными, полученными при верификации кода. Тесты проведены при расчетах парогенератора ПГВ-1000М [5] и модели трубного пучка ПГВ-1500 [6].

Самая теплофизически важная часть любого двухфазного кода – карта режимов двухфазного течения. Карта режимов кода КАНАЛ из работы [24] в настоящее время не применялась еще ни в одном из известных двухфазных кодов.

РЕЗУЛЬТАТЫ ВЫПОЛНЕННЫХ РАСЧЕТОВ И ВЫВОДЫ

Необходимость создания более совершенных быстрых динамических математических моделей для оборудования реакторного и турбинного цехов АС возникает из потребностей практики. Они необходимы также для проектирования нового поколения реакторных установок повышенной безопасности, нового поколения парогенераторов с повышенным сроком эксплуатации, для повышения эффективности и уровня безопасности уже работающих АС, наконец, вследствие необходимости поддержания на должном уровне знаний оперативного персонала. Разработка динамических математических моделей нового поколения, приме-

нимых в различных стационарных, переходных и аварийных режимах является актуальной задачей, решавшейся автором в течение ряда лет. Методами численного эксперимента и теоретически обосновать возможность достижения конечных результатов быстрыми и относительно простыми средствами является, на взгляд автора, главным в решении научно-технической проблемы детального расчетного анализа нестационарных теплогидравлических процессов в сложных контурах ЯЭУ.

Настоящая работа выполнена в соответствии с приоритетным направлением развития науки, технологии и техники в Российской Федерации «Энергетика и сбережение» в соответствии со списком приоритетных направлений развития науки, технологии и техники, утвержденным Президентом Российской Федерации В.В. Путиным 21 мая 2006 г. ПР-843.

В работе демонстрируются решения ряда задач, развивающих и расширяющих методологию моделирования теплогидравлических процессов в сложных контурах энергоустановок. Обобщенно конкретные новые результаты работы сводятся к следующему:

- впервые разработана система моделей и алгоритмов расчета реального времени для турбинного отделения, позволившая на их основе создать обучающие тренажеры для оперативного персонала АС с реакторами ВВЭР-440, ВВЭР-1000 и БН-600;
- разработан код КАНАЛ, выполнены верификационные расчеты на основе лицензированного кода TRAC и экспериментальных данных, по которым используемые карта режимов и система замыкающих соотношений могут быть верифицированы с требуемой для практики точностью.

Автор выполнял работу по нестационарным 3D-расчетам проектов горизонтальных парогенераторов в содружестве с сотрудниками ГНЦ РФ-ФЭИ В.В. Сергеевым, системным администратором В.В. Евстифеевым. Разработка математических моделей выполнялась в содружестве с коллективом ЭНИМЦ МС, руководимым к.т.н. В.А. Левченко и с коллегами из лаборатории математического моделирования н.с. А.Н. Поздняковым, к.т.н. С.Л. Дороховичем. Однако все приведенные результаты получены лично автором на всех стадиях работы.

Достоверность полученных результатов. Научные результаты работы основаны на сравнительном анализе замыкающих соотношений современной теории двухфазных неравновесных потоков. Выводы и рекомендации работы основаны на сопоставлениях с экспериментальными данными и опубликованных рекомендациях.

Все теоретические построения завершены частными вычислительными программами с целью верификации результатов расчета и подтверждения тем самым положенных в основу моделей предпосылок. Эти программы могут быть использованы при создании любого программного комплекса расчета контуров ЯЭУ или для решения отдельных задач.

- Разработана система математических моделей основного оборудования АС, работающих в реальном времени, которые впервые применены для моделирования в тренажерах Калининской АС (ВВЭР-1000), Кольской АС (ВВЭР-440) и Белоярской АС (БН-600).
- На основе анализа скорости выполнения тестовых задач существующими в отрасли кодами лучшей оценки выбран наиболее быстрый, и на его основе разработан код реального времени КАНАЛ, обладающий расширенной областью теплофизических свойств, пригодных для турбинного отделения АС типа БН, а также

обоснованной на сравнении с экспериментальными данными на модели пучка труб парогенератора системе замыкающих соотношений. В коде КАНАЛ после анализа массивов данных использованы те замыкающие соотношения (прежде всего, на основе отечественных рекомендаций и стандартов), которые отвечают современному уровню знаний тепломассообменных процессов.

- Для теплогидравлического обоснования кодов выполнен 3D-расчет верификационной задачи для парогенератора ПГВ-1000М на лицензионной версии кода TRAC для кросс-верификации кодов TRAC и STEG, имеющих одинаковую карту режимов течения, при детально согласованных исходных данных и одинаковых расчетных сетках. Обнаружены особенности решения, связанные с использованием различных моделей межфазного трения и трения при течении в пучках труб, был сделан вывод о необходимости сравнения кодов с экспериментальными данными, выполненный на следующем этапе работы.

- Выполнены пред- и посттестовые расчеты гидродинамической модели трубного пучка ПГВ-1500, предназначенной для обоснования ПГ для реактора нового поколения ВВЭР-1500. Проведен анализ влияния корреляций и карты режимов теплообмена на соответствие расчетных и экспериментальных данных и внесены соответствующие изменения в код КАНАЛ, получивший новое качество – способность правильно рассчитывать конденсацию внутри трубок на основе отечественных корреляций, а также формулу Д.А. Лабунцова для пузырькового кипения.

- На основе разработанной системы моделей и кода лучшей оценки КАНАЛ в фирме ЭНИМЦ МС впервые в полном объеме созданы функционально аналитические тренажеры реакторного и турбинного отделений Калининской АС (ВВЭР-1000), Кольской АС (ВВЭР-440) и Белоярской АС (БН-600), получены новые методические и дидактические результаты, необходимые и непосредственно используемые для обучения оперативного персонала АС.

Научные положения, выводы и рекомендации, сформулированные в диссертации, обоснованы анализом полноты системы уравнений и системы замыкающих соотношений, тестированием блоков кода на аналитических решениях и апробацией математических моделей кода на основе сравнения результатов моделирования с экспериментальными данными в пределах области их применимости. Верификация кода проведена на большом количестве локальных и интегральных экспериментов и кроссверификационных расчетов по «реперным» кодам данного класса. Верификация отдельных моделей определяется требованиями учебного процесса и осуществляется в рамках приемо-сдаточных испытаний тренажеров.

Возможно применение отдельных моделей и кода КАНАЛ в целом для обоснования проектов ВВЭР и БН и для учебных целей в университете (ИАТЭ, Обнинск) и других учебных заведениях, готовящих специалистов для работы на АС. Например, для обеспечения учебного процесса на Калининской АС в качестве демонстрационного материала к курсу в составе группы авторов [23] разработана учебная модель, обеспечивающая расчеты переходных процессов в части первого контура реактора ВВЭР-1000, ограниченного входными и выходными патрубками корпуса реактора для всех четырех петель. Модель выполнена для учебного курса, включающего в себя учебный материал, контрольные вопросы и демонстрационный материал, сопровождающий теоретические разделы курса по основам физики реакторов ВВЭР-1000.

Литература

1. Казанцев А.А., Левченко В.А. Динамическая модель конденсатора АЭС для тренажера // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2001. – № 1. – С. 46-56.

2. Худаско В.В., Казанцев А.А., Левченко В.А., Сергеев В.В. Разработка математической модели неравновесного двухфазного потока для анализа безопасности АЭС//Известия вузов. Ядерная энергетика – Обнинск. – 2001. – №2. – с. 41-53.
3. Казанцев А.А., Левченко В.А. Динамическая модель двухфазного теплообменника для тренажера//Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2001. – №2. – С. 89-98.
4. Rouhanifard S.A., Kazantsev A.A., Sergeev V.V. RELAP5 Modeling of the NPP VVER-1000 Steam Generator//Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2001. – №3. – С. 80-90 (англ.)
5. Сергеев В.В., Казанцев А.А. 3D- модель ПГВ-1000 на основе кода TRAC/Доклад на V1 Международном семинаре по горизонтальным парогенераторам (г. Подольск, 22-24 марта 2004 г.). – Подольск: ФГУП ОКБ «Гидропресс».
6. Сергеев В.В., Евстифеев В.В., Казанцев А.А., Поздняков А.Н. 3D- модель ПГВ-1500 на основе кода TRAC/Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР: Сб. докл. IV Международной научно-технической конференции (Подольск, 23-25 мая 2005 г.). – Подольск: ФГУП ОКБ «Гидропресс».
7. Kazantsev A.A., (Corresponding author), A.N. Pozdnyakov, V.V. Sergeev, Evstifeev V.A. 3D-Transient calculations of PGV-1000 based on TRAC/The 11-th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal – Hydraulic (NURETH-11). Popes palace Conference Center, Avignon, France, October 2-6, 2005. Log number 329.
8. Сергеев В.В., Евстифеев В.В., Казанцев А.А., Поздняков А.Н., Трунов Н.Б., Фильчуков А.И., Ситник Ю.К. Верификация кода TRAC на гидродинамической модели трубного пучка ПГВ-1500/Сб. докл. VII Международного семинара по горизонтальным парогенераторам (Подольск, 3 – 5 октября 2006 г.). Подольск: ФГУП ОКБ «Гидропресс».
9. Стандарт ФГУП концерна «Росэнергоатом» СТО 1.1.1.01.004.0680 – 2006 «Технические средства обучения».
10. Шкловер Г.Г., Мильман О.О. Исследование и расчет конденсационных устройств паровых турбин. – М., 1985.
11. Гольба В.С., Казанцев А.А. Тепловой расчет тихоходной влажнопаровой турбины на ЭВМ-МВССО СССР: Учеб. пособие по курсу «Паровые и газовые турбины» – Обнинск: Обнинский филиал МИФИ, 1985. – 32 с.
12. Казанцев А.А., Сергеев В.В., Дорохович С.Л., Левченко В.А., Поздняков А.Н. Быстрая динамическая модель бака/Тез. докл. отраслевого научно-технического семинара «Моделирование теплогидравлических процессов в активных зонах реакторов различного назначения». – Обнинск: ГНЦ РФ ФЭИ, 2002.
13. Соколов Е.Я., Зингер Н.М. Струйные аппараты. Изд. 2-е. – М.: Энергия, 1970.
14. Кузеванов В.С. Моделирование теплогидравлических процессов в контурах ЯЭУ/Автореферат дисс. на соиск. уч. ст. д.т.н. МЭИ (ТУ). – М.: МЭИ, 1995.
15. Мигров Ю.А., Юдов Ю.В. Корсар. Теплогидравлический расчетный код. Описание кода. – Соновый бор: НИТИ, 1999.
16. Spore J.W., Jolly-Woodruff S.J., Knight T.K., Lin J.C., Nelson R.A., Pasamehmetoglu K.O., Steinke, R.G. Unal Cetin end other TRAC-PF1/MOD2: Theory manual. V. I. – LANL Los Alamos, New Mexico, 87545, 1990.
17. Mahaffy J.H. A stability enhancing two step method for fluid flow calculations//J. Comput. Phys. – 1982. – 46. – P. 329-341.
18. Demmel J.W., Gilbert J.R., Li X.S. SuperLU Users guide. – University of California, Berkeley, September 1999 (Last update November 2007). – 75 p. (<http://acts.neresc.gov/superlu>).
19. Казанцев А.А., Сергеев В.В. 3D-расчеты с использованием кода TRAC течения в осесимметричном тупике/Сб. докладов Международного конгресса «Энергетика – 3000». – Обнинск, 2002.
20. Казанцев А.А., Поздняков А.Н., Сергеев В.В., Евстифеев В.В. Применение и кроссверификация кода TRAC для реакторов типа ВК и ПГВ-1000/Доклад на отраслевом научном семинаре Минатома «Разработка многомерных теплогидравлических кодов» (Обнинск, 14-16 мая 2003 г.). – Обнинск: ГНЦ РФ-ФЭИ.
21. Мелихов О.И., Мелихов В.И., Парфенов Ю.В., Бычкова Г.В., Бойко Н.Л., Евстифеев В.В., Казанцев А.А., Кумаев В.Я., Левченко В.А., Поздняков А.Н., Сергеев В.В., Ягов В.В. Доработка программного комплекса STEG для обеспечения возможности использования его для расчета роста отложений на теплообменных трубах парогенератора ПГВ-1000М/Научно-технический отчет ФГУП ЭНИЦ Инв. №1/3105, 01.03.2003: Электрогорский научно-исследовательский центр по безопасности атомных электростанций (ФГУП «ЭНИЦ») – 301 с.

22. RELAP5/MOD3. Code Manual. V. 1. – Idaho Natural Engineering Laboratory, Idaho, 1995.
23. Белозеров В.И., Сергеев В.В., Казанцев А.А., Поздняков А.Н., Каньшев М.Ю. Нейтронно-физическая и теплогидравлическая модель ВВЭР-1000 для обучения персонала // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2008. – № 2. – С. 99-106.
24. Taitel Y. 1990 Flow pattern transition in two phase flow. Heat Transfer 1990 Proceedings of the Ninth International Heat Transfer Conference Jerusalem, Israel, Volume 1 Plenary and Keynote Papers (IHTC 1990) p. 237 – 254 KN14.

Поступила в редакцию 9.10.2008

УДК 621.039.58

Thermohydraulics Simulation for PHEBUS Containment \A.A. Bryzgalov, A.A. Natalenko, F. De Rosa, S. Tirini, N. Voukelatou; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2008. – 10 pages, 5 tables, 3 illustrations. – References, 8 titles.

Verification and validation study of ASTEC code on the PHEBUS FPT1 experiment have been performed. The ASTEC coupled and the ASTEC CPA stand-alone containment calculations for the bundle degradation phase of experiment have been made. For the CPA stand-alone calculation the inlet steam and hydrogen flow rates sensitivity analyses has been made within the uncertainty of experimental data. Studying of the dependence between different geometry models of the containment and computational values was carried out. General patterns of the thermohydraulics behavior were found and probable reasons of discrepancies between ASTEC prediction and experimental results were noted.

УДК 621.039.534.63

Simple Formulas for Thermodynamic Properties of Sodium \A.A. Kazantsev, A.S. Kondratyev; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2008. – 8 pages, 11 tables, 8 illustrations. – References, 5 titles.

As the coolant, sodium is widely used in the fast breeder reactors, but for its calculation with use of code OpenFOAM wider set of formulas, in comparison with published in reference books is required. For codes of computing hydrodynamics (CFD codes), such as OpenFOAM, by an Open Source license code there is possibility to change the source code text according to any applied problem, it was required to find or to obtain simple formulas for calculation thermo physics properties of sodium. Initial data for obtaining interpolation functions are taken from domestic and foreign handbook. The set of the calculated functions describing necessary for calculated codes thermodynamic and thermal physics properties of sodium and its steams, namely: dynamic viscosity, heat conductivity, superficial tension, thermal conductivity, heat of evaporation, pressure on saturation line from temperature, density on saturation line, Prandtl number on a saturation line were received.

УДК 621.039.5

Development of Thermal Hydraulic Code KANAL and Thermal Physics Models for NPP Simulators \A.A. Kazantsev; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2008. – 10 pages. – References, 24 titles.

For supporting of NPP simulators development there was performed the cycle of thermal physics and thermodynamic works, the set of models of main equipment, two phase non equilibrium code KANAL based on 6 equation model. The new flow map pattern was applied in the code and was used Russian correlation for bubble boiling and for condensation into tube, that is different from known code prototype, such as TRAC. For learning the TRAC code correlations there were performed accurate 3D transient calculations of some problems, including horizontal steam generator calculations, there was performed comparison of calculations with the experimental model of top quarter of tube bundle of horizontal steam generator.

УДК 621.039.548

Non-Stationary Hydrodynamic Loadings and Fuel Rods Beam Vibrations in Fuel Assembly WWER-440 \V.V. Perevezentsev, V.I. Solonin, F.D. Sorokin; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2008. – 9 pages, 5 illustrations. – References, 3 titles.

Are received by on a full-scale test model experimental data on flow-induced vibrations of a fuel rods beam in fuel assembly WWER-440. Essential influence of hydrodynamics of a stream before a basic lattice (on an input in a fuel rods beam) on intensity of vibrations is shown. On measurements of pulsations of pressure in a backlash between an internal surface a cover and an external series fuel rods the non-stationary hydrodynamic forces influencing a fuel rods beam and causing it of vibration are defined. The mechanical model of a fuel rods beam on the basis of its description as beams with low