КОРСАР
РАСЧЕТНЫЙ КОД НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ ДЛЯ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДИНАМИКИ ЯЭУ

Ю.А. Мигров, Ю.В. Юдов, И.Г. Данилов, С.Н. Волкова, В.Г. Коротаев, В.В. Кутьин, Б.Р. Бондарчик, Д.В. Бенедиктов

Научно-исследовательский технологический институт (НИТИ) им. А.П. Александрова

(Доклад на Региональном информационном форуме по аналитическим методам и компьютерным кодам оценки безопасности атомных станций с реакторами типа ВВЭР и РБМК)

Обнинск, 16 – 20 октября 2000 г.

Решение о создании теплогидравлического расчетного кода улучшенной оценки, предназначенного для комплексного моделирования динамики ядерных энергетических установок, было принято руководством института в 1995 г. В соответствии с техническим заданием на разработку запланировано создание трех базовых версий расчетного кода КОРСАР.

Первая версия кода (рис. 1) по функциональному наполнению базируется на двухжидкостной, т.е. термически и механически неравновесной для двухфазного потока, модели нестационарной контурной теплогидравлики, но однокомпонентной (вода, пар); включает в себя точечную модель кинетики реактора, модель переноса жидкого поглотителя, модели для расчета динамики отдельных элементов оборудования контуров теплообмена реакторных установок с водяным теплоносителем, а также моделирование элементов управления и регулирования.

Во второй версии (рис. 2), дополнительно к первой, предполагается учет влияния неконденсирующихся газов, а также расширение номенклатуры моделируемого оборудования, включая элементы паро-турбинной установки.

В третьей версии (рис. 3) расчет нестационарных нейтронно-физических процессов осуществляется на основе пространственной модели кинетики реактора.

В процессе реализации проекта перед нами стояли три основных задачи (рис. 4).

Первая задача технологическая. То есть необходимо было разработать средства общения пользователя с расчетным кодом, которые бы обеспечивали решение разнообразных задач контурной теплогидравлики в режиме гибкой топологии. Конечно, эта задача затрагивала и идеологию построения функциональной части расчетного кода.

Вторая проблема – это физико-математические модели и численные методы, и третья – верификация кода.

Первая задача была успешно решена в течение 1996-97 г.г. То есть за довольно короткий срок применительно к расчетному коду КОРСАР была разработана гибкая технология, которая обладает следующими свойствами (рис. 5).

Особо следует отметить возможность формирования и решения задач в режиме гибкой топологии, то есть расчет реакторных установок с произвольными составом и компоновкой оборудования без перетрансляции расчетного кода. И второе - переносимость кода, то есть возможность его инсталляции и получения адекватного расчетного результата на ЭВМ с произвольными операционными системами, имеющими транслятор с языка Фортран-77. Сегодня мы имеем опыт функционирования расчетного кода в наиболее распространенных операционных системах Open /VMS на ЭВМ Alfa Server, UNIX, Windows-NT, Windows-95 (98) на ПЭВМ.

Для общения пользователя с расчетным кодом разработан специализированный, достаточно мощный и мнемоничный язык DLC (рис. 6), который используется для кодирования входных данных задачи. В 1998 г. в опытную эксплуатацию введен графический интерфейс (система ГРОТ), обеспечивающий ввод данных и отображение информации графическими средствами.

Вторая проблема, которая решалась в процессе создания расчетного кода – это физико-математические модели и численные методы.

Необходимо отметить, что к началу разработки кода КОРСАР у нас в институте имелся значительный задел (рис. 7). В начале 90-х годов для расчетов нестационарной контурной теплогидравлики была разработана программа ДЖИП, в которой уже была реализована двухжидкостная модель двухфазного потока (6 уравнений сохранения) и которая к 96-му году имела значительный опыт эксплуатации. К середине 90-х годов была завершена разработка программного комплекса PARNAS, в котором также реализована двухжидкостная модель. Этот программный комплекс был аттестован в ГАН РФ в 97 году. Программа NERA в течение длительного времени использовалась для отработки и обоснования всережимной модели потока дрейфа двухфазного потока в парогенерирующих каналах.

Наконец, в институте за многие годы накоплен значительный опыт математического моделирования динамики различных элементов оборудования реакторных установок.

Справедливости ради следует отметить, что значительное влияние на решения, принимаемые при разработке кода КОРСАР, оказали зарубежные расчетные коды улучшенной оценки. В частности, различные версии американской программы RELAP5 в исследовательских целях эксплуатируются у нас в институте в течение

последних 10 лет.

Основой функционального наполнения кода КОРСАР, имеющего модульную структуру, является блок расчета нестационарной контурной теплогидравлики (рис. 8). Именно в этом блоке реализован алгоритм численного решения шести основных уравнений сохранения для жидкой и паровой фаз, сформулированных при двух основных допущениях: давления фаз равны, а течение теплоносителя одномерно.

Дискретизация уравнений по пространственной координате осуществлена по методу контрольных объемов с аппроксимацией конвективных членов по схеме против потока. Для численного решения систем конечно-разностных уравнений разработана оригинальная безытерационная полунеявная схема с автоматическим выбором шага интегрирования по времени.

В обеспечение функционирования блока контурной теплогидравлики в составе функционального наполнения имеются два вспомогательных программных блока (см. рис. 8):

- расчет замыкающих соотношений теплогидравлической модели;
- расчет термодинамических свойств воды и водяного пара.

В состав функционального наполнения расчетного кода входит также набор специализированных программных модулей, обеспечивающих расчет динамики отдельных элементов оборудования.

Наиболее сложной частью двухжидкостной теплогидравлической модели являются замыкающие соотношения. Выбор и обоснование замыкающих соотношений осуществлялись при разработке первой версии кода на основе опубликованных отечественных и зарубежных рекомендаций.

Важную роль в обосновании замыкающих соотношений сыграли результаты верификации расчетного кода по отдельным физическим явлениям и анализы чувствительности.

Основой методики расчета замыкающих соотношений, конечно, являются картограммы режимов течения двухфазного потока. Применительно к расчетному коду КОРСАР разработаны и программно реализованы раздельные картограммы для горизонтальных и вертикальных каналов.

На рис. 9, в качестве примера, в координатах (модифицированный критерий Фруда – истинное объемное паросодержание) представлена картограмма режимов течения двухфазной смеси в горизонтальных трубах. Здесь же обозначены те режимы течения, в которых применительно к расчетному коду КОРСАР используются оригинальные (не заимствованные) методики расчета межфазного трения (левый рисунок) и межфазного теплообмена (правый рисунок).

Несколько слов о специализированных программных модулях. В состав первой версии расчетного кода входят модули расчета динамики следующих процессов и элементов оборудования (рис. 10).

Уровень доверия к результатам, получаемым с помощью расчетного кода, определяется многими факторами. Решающим из них, если говорить о теплогидравлическом коде, является объем верификации, документально оформленный в виде верификационного отчета.

В процессе верификации расчетного кода КОРСАР рассматриваются два этапа (рис. 11):

- Локальная верификация – это, по-существу, обоснование замыкающих соотношений теплогидравлической модели и адекватности воспроизведения расчетным кодом отдельных физических явлений.
- Интегральная верификация – сравнение расчета с экспериментальными данными, полученными на интегральных теплогидравлических стендах и в натурных условиях на реакторных установках АЭС.

Следует отметить, что наш институт располагает уникальными экспериментальными данными, полученными на стендовых установках с реальными реакторами и которые используются для верификации кодов, особенно в части взаимного влияния нейтронно-физических и теплогидравлических процессов.

Общее представление об объеме локальной верификации, выполненной к настоящему времени по первой версии кода, и результаты которой сведены в верификационном отчете, дает таблица на рис. 12. Это около 3000 стационарных экспериментальных точек, расчет которых для различных конструкций локальных теплофизических стендов выполнен по «замороженной» версии кода методом установления. Совершенно очевидно, что такой объем расчетов может быть реализован лишь при наличии мощных ЭВМ и мобильных средств ввода данных.

На рис. 13, в качестве примера, приведено сопоставление результатов расчета и эксперимента по толщине жидкой пленки в вертикальной трубе при дисперсно-кольцевом режиме течения. А на рис. 14 - зависимость истинного объемного паросодержания от расходного для горизонтальной трубы, демонстрирующая переход в расслоенный режим течения.

Первая версия расчетного кода КОРСАР была сдана в эксплуатацию в 1998 г. Поэтому к настоящему времени нами выполнен ограниченный объем интегральной верификации (рис. 15). В течение последних шести лет наш институт участвует в верификации теплогидравлических кодов на интегральном стенде ИСБ-ВВЭР (ЭНИЦ, г. Электрогорск). По инициативе ЭНИЦ эта работа была организована в режиме стандартных проблем безопасности, то есть с выполнением «слепых»

претест-расчетов и последующих посттест-расчетов, когда расчетчикам предоставлялись все результаты эксперимента.

По такой технологии на стенде ИСБ-ВВЭР были выполнены четыре стандартные задачи.

Эксперимент третьей стандартной задачи заключался в имитации на стенде малой течи теплоносителя из верхней камеры смешения с наложением дополнительного отказа – полного обесточивания (т.е. отключение ГЦН в петлях теплообмена, прекращение отбора пара и подачи питательной воды в парогенераторы) и с последующим срабатыванием САОЗ высокого давления. Подача воды САОЗ с постоянным во времени расходом осуществлялась в холодную нитку аварийной петли. На рис. 16, 17, 18 представлены результаты эксперимента и расчета для некоторых измеренных параметров стенда.

На рис. 19 представлены результаты посттестового расчета эксперимента, выполненного на стенде PACTEL (Финляндия) и известного, как ISP33.

Серьезным экзаменом для расчетных кодов является численное моделирование нестационарных теплогидравлических процессов в пассивных системах безопасности, которые находят все большее применение в проектах АЭС нового поколения. Для этих процессов, происходящих, как правило, при низких давлениях и массовых скоростях теплоносителя, характерна значительная термическая и механическая неравновесность двухфазных потоков.

Уникальные экспериментальные результаты, в частности, были получены на стенде ИСТ (ЕЦ), сооруженном нашим институтом совместно с НПО ЦКТИ и который предназначен для моделирования динамики отвода остаточного тепла АЭС с ВВЭР-640 к конечному поглотителю через аварийный бассейн на заключительной стадии аварий с потерей теплоносителя (рис. 20).

Стенд имеет простую конструкцию: модели реактора, бассейна выдержки и аварийного бассейна, которые открыты на атмосферу, соединены между собой трубопроводами согласно схеме отвода остаточного тепла реактора.

В процессе исследований на этом стенде была выявлена низкочастотная колебательная неустойчивость естественной циркуляции в неизотермическом разомкнутом контуре.

Как видно из рис. 20, 21, расчетный код КОРСАР адекватно воспроизводит процессы в рассматриваемом контуре. Необходимо обратить внимание на шкалу времени: весь эксперимент длится около 4 часов, а период колебаний теплогидравлических параметров составляет 3-4 минуты.

Работы по верификации первой версии кода КОРСАР продолжаются.

В этом году по инициативе ГНЦ РФ ФЭИ была выполнена стандартная задача

по повторному заливу 7-стержневой сборки модели ТВС, результаты которой приведены на рис. 22.

Во второй половине 1999 г. Отраслевым Центром МАЭ РФ по расчетным кодам для АЭС и реакторных установок (ОЦРК) был организован тендер с целью выявления наиболее перспективного с точки зрения дальнейшей разработки российского теплогидравлического расчетного кода улучшенной оценки. В свете решений, принятых по результатам тендера, дальнейшее развитие кода КОРСАР осуществляется под научно-техническим руководством ОЦРК с привлечением к этому проекту, кроме НИТИ, других организаций Минатома и Российской Академии наук.

К настоящему времени первая рабочая версия кода КОРСАР инсталлирована и эксплуатируется в следующих организациях (рис. 23). В частности, в Санкт-Петербургском государственном техническом университете расчетный код КОРСАР третий год используется при обучении студентов.

В соответствии с планами ОЦРК работы по первой базовой версии с выпуском заключительной редакции верификационного отчета будут завершены в первой половине 2001 года.