ОСОБЕННОСТИ ЧИСЛЕННОГО РЕШЕНИЯ УРАВНЕНИЙ СОХРАНЕНИЯ ДВУХЖИДКОСТНОЙ МОДЕЛИ НЕСТАЦИОНАРНОЙ КОНТУРНОЙ ТЕПЛОГИДРАВЛИКИ В РК КОРСАР

Ю.В. Юдов

Научно-исследовательский технологический институт имени А.П. Александрова (НИТИ), 188540, Россия, Ленинградская обл., г. Сосновый Бор, тел.(812-69) 60-703, факс: (812-69) 636-72

Ключевые слова: расчетный код КОРСАР, двухжидкостная модель, полунеявная схема.

Основой функционального наполнения расчетного кода (РК) КОРСАР является блок расчета контурной теплогидравлики реакторных установок и других теплоэнергетических систем с водяным теплоносителем, к которому предъявляются два главных требования:

- обеспечение высокого уровня математического описания физических процессов в циркуляционных контурах и снятие излишнего консерватизма при расчетном анализе нестационарной теплогидравлики реакторных установок;
- реализация возможности расчета внутриконтурных процессов теплогидравлических систем с произвольной топологией.

Отдельное оборудование и физические процессы (например, баки, компенсатор давления, насосы и т.д.) рассчитываются в РК КОРСАР в специализированных модулях по явной схеме и определяют граничные условия для блока контурной теплогидравлики.

Моделирование динамики двухфазного потока в теплогидравлических контурах осуществляется в РК КОРСАР в одномерном двухжидкостном (неравновесном и негомогенном) приближении с равным давлением фаз. Каждая фаза характеризуется параметрами, усредненными по сечению каналов, и описывается уравнениями сохранения массы, энергии и количества движения. Процессы, которые являются следствием поперечных градиентов, т.е. тепловые и механические межфазные взаимодействия, а также тепловые и механические взаимодействия фаз со стенками каналов, учитываются в виде членов уравнений с термодинамическими потенциалами с использованием эмпирических соотношений для коэффициентов переноса.

В РК КОРСАР осуществлен новый подход к математическому моделированию дисперсно-кольцевого режима течения двухфазного потока, позволяющий в рамках двухжидкостной модели дифференцировать влияние пленки жидкости и взвешенных в газовом ядре капель на характеристики потока. При этом предполагается, что:

- капли переносятся со скоростью газа;
- температуры жидкости в виде капель и пленки одинаковые;
- поток находится в состоянии динамического равновесия;
- объемная доля капель в ядре потока $\overset{*}{E}$ определяется из эмпирических корреляций по локальным теплогидравлическим параметрам теплоносителя.

При дисперсно-кольцевом режиме течения конвективные члены в уравнениях сохранения жидкой фазы разбиваются на две составляющие, которые отражают перенос массы и энергии жидкой фазы вдоль канала пленкой и каплями, а уравнения сохранения количества движения записываются отдельно для газо-капельного ядра и жидкой пленки. Скорость жидкой фазы в этом случае будет представлять собой в

системе уравнений скорость жидкой пленки, а скорость газа – скорость газо-капельного ядра, что позволяет в качестве замыкающих соотношений по трению пленки жидкости о стенки каналов и межфазному трению газо-капельного ядра и пленки использовать традиционные корреляции трехжидкостных моделей.

В других режимах течения теплоносителя принимается $\overset{*}{E} = 0$ и система уравнений сохранения принимает классический вид для двухжидкостной модели.

При получении дискретных аналогов уравнений сохранения в РК КОРСАР реализованы следующие базовые принципы:

1. Разностные уравнения сохранения массы и энергии фаз составляются балансным методом в консервативной форме.
2. По координате используется смещенная (шахматная) сетка, когда скалярные переменные потока (давление, энтальпии и объемные доли фаз) определяются относительно центров расчетных ячеек, а векторные переменные (скорости фаз) рассчитываются на границах расчетных ячеек.
3. Аппроксимация конвективных членов переноса массы и энергии фаз осуществляется по схеме против потока.
4. Выбрана полунеявная численная схема, то есть аппроксимация по неявной схеме применена лишь для членов уравнений, которые необходимы для обеспечения устойчивости численного решения, получения "мягкого" условия Куранта (не содержащего скорости звука в двухфазной среде), а также для членов уравнений, описывающих физические процессы, характеризующиеся малыми постоянными времени. Особенностью численной схемы РК КОРСАР является неявная аппроксимация членов, моделирующих межфазный теплообмен как по температурному напору (T_f - T_s), так и по площади межфазной поверхности, пропорциональной объемному паросодержанию, для режимов конденсации пара пузырьковой структуры в недогретой воде.
5. С целью исключения итераций при численном решении производится линеаризация неявных членов.

Дисбалансы массы и энергии фаз вследствие линеаризации нестационарных членов вычисляются на каждом временном слое по явной схеме в виде дополнительных источников (с учетом изменения шага по времени).

Особенность полунеявной численной схемы заключается в том, что решение системы конечно-разностных уравнений сводится к задаче определения поля давления на новом временном слое. В случае расчета одного канала поле давления находится из решения системы линейных алгебраических уравнений с трехдиагональной матрицей, которая эффективно решается методом прогонки. При расчете разветвленного контура матрица коэффициентов в уравнениях, описывающих поле давления, перестает быть трехдиагональной, но имеет разреженную структуру.

В этом случае система линейных уравнений относительно поля давления, матрица коэффициентов которых имеет разреженную структуру, может быть решена одним из известных классических методов. Именно такой подход реализован в известных теплогидравлических кодах улучшенной оценки (TRAC, RELAP5 и др). Однако применительно к РК КОРСАР разработан новый, более эффективный для решения задач контурной теплогидравлики, безытерационный метод расчета поля давления в разветвленном контуре произвольной топологии, основанный на методе прогонки.

Метод включает в себя три этапа. На первом этапе для каждого канала теплогидравлической системы, используя рекурентные соотношения метода прогонки, определяются коэффициенты линейных зависимостей давлений первой и последней

расчетных ячеек каждого из каналов от давлений на его концах (в точках ветвления или в граничных ячейках).

На втором этапе осуществляется расчет давлений в точках ветвления контура. Это оказывается возможным благодаря преобразованию исходной полной системы уравнений в систему линейных уравнений более низкого порядка для давлений в точках ветвления, подставляя линейные зависимости, полученные на первом этапе в уравнения, связывающие давления в точках ветвления контура с давлениями в расчетных ячейках каналов, соседних с расчетной ячейкой, представляющей узел ветвления.

На третьем этапе по известным давлениям в точках ветвления обратной прогонкой рассчитывается поле давления в каналах.

Важно отметить, что предложенный метод, как показано в докладе, превосходит классические методы решения полной системы уравнений относительно давлений в расчетных ячейках разветвленного контура циркуляции более чем на порядок по быстродействию. Кроме того, этот метод позволяет программно обеспечить модульную структуру блока контурной теплогидравлики и без особых усилий распараллеливать вычисления в случае использования многопроцессорных компьютеров.