

Совершенствование физико-математических моделей двухфазной теплогидравлики при модернизации системных кодов для обоснования безопасности ЯЭУ с ВВЭР

Корниенко Ю.Н., Чуркин А.Н., Быков М.А.

*АО ОКБ «ГИДРОПРЕСС», Подольск, Московская обл., ул. Орджоникидзе, 21
kornienko_un@grpress.podolsk.ru*

Ключевые слова: аналитические модели, двухфазные, неравновесные, турбулентные потоки, квази-одномерная форма, дефекты импульса, энтальпии и массы нодализационной схемы

Введение. Расчетные исследования в обоснование безопасности современных высоконапряженных ЯЭУ с ВВЭР, допускающих кипение теплоносителя на выходе активных зон, нуждаются в совершенствовании физико-математических моделей двухфазных неравновесных турбулентных потоков (ДНТП) в широкой области режимных условий не только в аварийных, но и в номинальных режимах. Основным инструментом для таких расчетов являются известные одномерные (1D) контурные коды типа RELAP5, КОРСАР/ГП и им подобные, а также субканальные (ячейковые) коды типа КАНАЛ, SC-1, ТИГРСП и другие. Используемые ими, в так называемом «гидравлическом приближении», 1D эмпирические модели переноса импульса, тепла и массы, хотя и обеспечивают экономию памяти и времени счета, но оказываются ограниченными в полноте описания механизмов переноса и границах диапазонов применения. Они имеют значительную неопределенность в предсказании важнейших для обоснования безопасности характеристик, таких как температура твэла, критический тепловой поток, перепад давления в субканалах и ТВС в целом.

Погрешность расчетных результатов 1D кодов увеличивается с ростом неравновесности и негомогенности двухфазных потоков, в частности, дискретно-пузырьковых и капельных (в особенности с при высокой термической и скоростной неравновесности фаз), характерных для ненормальных и аварийных режимов ЯЭУ. Физический смысл недостаточности моделей «гидравлического приближения» связан с неучетом влияния неоднородных 3D профилей скорости, температур/энтальпий, и паросодержаний, а также источников/стоков за счет генерации/конденсации, инерционных и массовых сил в поле потока теплоносителя.

Преимственность и преимущества предлагаемого подхода. В работе представлена квази-одномерная (к1D) методология направленная на совершенствование физико-математических моделей ДНТП контурных и субканальных кодов, основанная на корректном пространственно-временном осреднении локальных параметров. В ее основе лежат свойства масштабной инвариантности статистических характеристик, связанных с универсальностью спектров турбулентных структур А.Н. Колмогорова и работах о консервативных свойствах пограничного слоя С.С. Кутателадзе. В настоящее время положения этих теорий можно рассматривать как следствия более общей теории масштабирования (scaling) и неполной автомодельности Г.И. Баренблатта - Я.Б. Зельдовича.

Исходным пунктом применения к1D методологии является пространственно-временное осреднение в поперечном сечении канала локальных профилей переменных ДНТП в виде интегралов по поперечному сечению канала (субканала) с весом по массовой скорости 3D законов сохранения импульса, энергии и массы в форме модели потока дрейфа (или 2х-жидкостного течения). Эта процедура обеспечивает корректный переход от исходного 3D описания к квази-1D представлению левой и правой частей

законов сохранения импульса, энергии и массы в виде мультипликативных корректирующих коэффициентов, названных - параметрами распределений (ПР) - впервые были получены в гомогенном приближении А.А. Армандом (СССР) и уточнены N. Zuber (США), и - факторов формы (ФФ) - впервые предложены работах школы Б.С. Петухова и В.П. Попова (СССР, МЭИ-ИВТАН) для неизотермических однофазных потоков.

С физической и математической точек зрения ПР и ФФ представляют собой интегральные (осредненные в поперечном сечении канала) критерии влияния распределенных переменных: скорости, энтальпии и паросодержания, а также источников/стоков за счет генерации/конденсации, инерционных и массовых сил в ДНТП. Именно эти поправки к одномерной форме текущих моделей названных выше кодов, отвечая за оценку пространственной распределенности основных переменных и определяют предложенную модель как квази-1D с более широкой областью применения и глубиной физических интерпретаций. Кроме того, они дают оценку дефектов импульса, энтальпии и массы для контрольных объемов нодализационной схемы, обеспечивая улучшение сходимости итераций и оценки эффективности k1D кода.

Достоверность результатов, полученных с помощью квази-1D методов, подтверждается их проверкой и сопоставлением с существующими альтернативными методами, включая анализ и выполнение «принципа соответствия», а также выводом канонических моделей и образцовых (бэнчмарк) решений. В частности, редукция обобщенных k1D соотношений к частным, известным из работ N. Zuber, M. Ishii, Б.С. Петухова–В.Н. Попова, и других исследователей, подтвердила выполнение предельных переходов при асимптотическом вырождении влияния ПР и ФФ.

Научная и практическая значимость заключается в разработке единого физико-математически обоснованного метода перехода к более корректному одномерному описанию двухфазных потоков на основе обобщенных квази-1D аналитических моделей и замыкающих соотношений для ПР и ФФ, входящих в коэффициенты трения, тепло- и массообмена, с более широкой областью применения и возможностями снижения степени консервативности используемых одномерных методик и кодов. С их помощью выявлены закономерности комбинированного влияния нелинейных немонотонных распределений потоков импульса, тепла и массы на аномальное поведение трения и теплообмена, наблюдаемое в экспериментах при значительной негомогенности двухфазных потоков. Эти замыкающие соотношения построены в обобщенных переменных и обладают повышенной эвристической ценностью, что позволяет использовать их для прогнозирования теплогидравлических характеристик оборудования в тех областях, экспериментальное исследование которых в настоящее время невозможно или затруднено, например, при анализах теплогидравлики на различных стадиях аварий с потерей теплоносителя в ЯЭУ.

Заключение. Предложенный квази-1D метод содержит разрешение основного противоречия между необходимостью применения весьма трудоёмких и находящихся лишь на подступах к реализации для промышленных и проектных расчетов ДНТП 3D CFD кодов и, используемых в настоящее время, контурных и субканальных 1D кодов. При этом, квази-1D метод обеспечивает решение задачи модернизации исходных физико-математических моделей процессов переноса импульса, тепла и массы ДНТП, включая улучшение итерационных схем алгоритма решения, в том числе за счет повышения точности и диапазонов применимости коэффициентов трения, тепло- и массопереноса, что в итоге снижает излишнюю консервативность рекомендаций по результатам анализов теплогидравлической безопасности ЯЭУ.

Доклад подготовлен в рамках первого этапа инвестиционного проекта «Разработка квазиодномерной модели, расчетного кода и матрицы верификации для анализа теплогидравлических характеристик двухфазных неравновесных потоков в ТВС ВВЭР».