

3. High temperature gas-cooled reactors/or the production of hydrogen: an assessment in support of the hydrogen economy. — In: EPRI Report CA 2003.92121-2767. Palo Alto, 2003, p. 9—32.
4. Chudin A.G., Cukharev Yu.P. Potential for power utilization of weapon-grade plutonium in GT-MHR nuclear reactor. — In: OECD Proc. of the First Information Exchange Meeting on Basic Studies on High-Temperature Engineering Held in Paris. France, 27—29 September, 1999, p. 79—88.
5. Evaluation of Materials Issues in the PBMR and GT-MGR. — In: EPRI Report CA 2002.1007505, Palo Alto, 2002, p. 53—56.

Поступила в Редакцию 14.07.04

УДК 621.039.576

ВЕРИФИКАЦИЯ ТЕПЛОГИДРАВЛИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ КОДОВ УЛУЧШЕННОЙ ОЦЕНКИ НА ПРИМЕРЕ МОДЕЛИ ДВУХФАЗНОГО ПОТОКА КОДОВ RELAP5 И КОРСАР

*Миронов Ю.В., Радкевич В.Е., Журавлева Ю.В., Кузин А.В.,
Мокроусов К.А., Яшников Д.А. (НИКИЭТ им. Н.А. Доллежалы)*

Потребности исследования динамических процессов при анализе аварийных ситуаций вызвали развитие обобщенных теплогидравлических кодов улучшенной оценки, отражающих состояние современной теплофизики. Методики расчета, реализованные в кодах улучшенной оценки, построены на основе системы законов сохранения, дополненной набором полуэмпирических замыкающих соотношений. Набор замыкающих соотношений определяет преимущественную область применения кода, его специфику, а также значительную долю неопределенности получаемых с помощью кода результатов. Сложность и нелинейность рассматриваемых задач не позволяют во многих случаях непосредственно оценить, какое сочетание параметров в замыкающих соотношениях и граничных условиях задачи обеспечит наибольший консерватизм получаемых решений, степень которого требуется обосновывать при анализе безопасности. Современные методики оценки неопределенности результатов расчетов предполагают, что для каждого эмпирического соотношения известна плотность вероятности распределения погрешности или, по крайней мере, среднеквадратичная погрешность. В документации кодов данные о погрешности замыкающих соотношений обычно приводятся на основании оригинальных оценок авторов корреляций. Авторы каждого отдельного замыкающего соотношения подбирают для него параметры, обеспечивающие наилучшее в некотором смысле совпадение результатов расчета с опытными данными, а характеристики разброса измеренных значений для рассматриваемых серий экспериментов относительно кривых, описываемых предложенным соотношением, сообщают пользователям в качестве среднеквадратичной погрешности. В принципе, замыкающие соотношения, если их получение требует расчета неизмеряемых в эксперименте теплогидравлических параметров, должны строиться с использованием непосредственно тех кодов, для которых они предназначены.

Таким образом, необходимым этапом верификации кода и анализа неопределенности теплогидравлических расчетов является критическая переоценка погрешностей параметров некоторых важных теплогидравлических корреляций непосредственно с использованием опытных данных. Один из возможных вариантов

процедуры уточнения параметров замыкающих соотношений в составе кода улучшенной оценки и результаты ее применения описываются в настоящей статье на примере модели двухфазного потока Зубера—Финдлея.

Методология верификации. Рассмотрим встроенное в произвольный теплогидравлический код замыкающее соотношение T . Ставится вопрос о том, насколько принятый в коде коэффициент k замыкающего соотношения T является статистически согласованным с экспериментальными данными, отличными от тех, на основе которых было получено это самое значение. Другими словами, стоит вопрос о статистической верификации модели теплогидравлического кода, описываемой замыкающим соотношением T , на основе независимых от этой модели экспериментальных данных.

Для ответа на поставленный вопрос с заданным уровнем надежности P строится доверительный интервал для математического ожидания оптимального коэффициента k замыкающего соотношения T . Здесь под оптимальным коэффициентом понимается такое его значение, при котором среднеквадратичное отклонение расчета от эксперимента минимальное. Напомним, что с вероятностью P именно в доверительном интервале содержится математическое ожидание оптимального коэффициента k [1].

Для построения доверительного интервала выполним следующую последовательность действий. Построим с помощью генератора случайных чисел m репрезентативных выборок объемом в n точек из генеральной совокупности экспериментов. Проведем расчеты для каждой из m построенных выборок, варьируя коэффициент k замыкающего соотношения T . В результате анализа результатов этих вариантных расчетов найдем оптимальный коэффициент k для каждой из m выборок. Теперь, имея выборку k , найдя ее среднее $\bar{k}$, дисперсию S^2 , задавшись уровнем надежности P и отыскав в таблице распределения Стьюдента значение t_p , построим доверительный интервал для математического ожидания оптимального коэффициента k для генеральной совокупности экспериментов. Как известно из математической статистики [2], случайный интервал с концами в точках $\bar{k} - t_p S / \sqrt{m-1}$ и $\bar{k} + t_p S / \sqrt{m-1}$ с вероятностью P содержит внутри себя неизвестное математическое ожидание оптимального коэффициента k .

Отметим, что построение доверительного интервала не связано с принятым в коде коэффициентом k . После построения доверительного интервала посмотрим, попадает ли встроенное в код значение внутрь этого интервала. В случае попадания можно говорить о статистической верифицированности исследуемой модели изучаемого кода на основе использованных экспериментальных данных. Действительно, в этом случае принятое в коде значение попадает в ту область числовой прямой, которая с вероятностью P содержит математическое ожидание оптимального значения исследуемого коэффициента k .

Следует отметить, что при таком подходе к верификации устраняется произвольность экспертной оценки согласия расчетов с рассматриваемыми экспериментами, присутствующая при традиционном сравнении расчетов с опытными данными.

Модели двухфазного потока кодов RELAP5 и KOPCAP. Для апробации описанной методики были проведены верификационные расчеты для двух обще-

контурных гидродинамических кодов: RELAP5 [3], являющегося в настоящее время общепризнанным мировым стандартом для динамических расчетов реакторов, и интенсивно развивающегося отечественного кода КОРСАР [4].

Объектом анализа были выбраны модели межфазного трения, встроенные в коды, основанные на модели двухфазного потока. Эта модель использует для обобщения опытных данных кинематическое соотношение

$$j_g = \alpha_g C_0 j + j_{gi}(\alpha_g, j, j_g, \dots),$$

где j_g — приведенная скорость газовой фазы; j — приведенная скорость двухфазного потока; α_g — объемное паросодержание; C_0 — параметр неравномерности; j_{gi} — разность скоростей фаз.

Обычно в эксперименте измеряют расход и объемное паросодержание. Если идеализировать ситуацию, то можно предположить, что в некотором эксперименте при постоянном расходе воды и пара получают серию значений паросодержания α_g , усреднение которых дает среднее значение этого параметра. Тогда приведенное уравнение становится линейной формой относительно неизвестных C_0 и j_{gi} . Набор экспериментов с различным расходом позволил бы, минимизируя погрешность, определить их тем или иным способом, но на практике реализуется совсем другой подход.

Для вертикального пузырькового и снарядного течений при массовой скорости больше 100 кг/(м²·с) для параметра C_0 используется корреляция EPRI, включающая сложную зависимость и от α_g , в то время как корреляция для j_{gi} большей частью пропорциональна произведению $\alpha_g \alpha_f$. C_0 может определяться в независимых экспериментах по измерению локального распределения паросодержания и потоков по сечению канала, но в реальности, конечно, полученные таким образом значения подправляются еще и на основе обычных экспериментов по измерению среднего по сечению паросодержания. Для меньшей массовой скорости при тех же режимах в трубах небольшого диаметра используется модель Зубера—Финдлея, в которой параметр C_0 принимается равным 1,2, поток дрейфа является линейной функцией α_g .

Задачей расчетного анализа являлась проверка гипотезы о статистическом согласии принятых в коде значений этих коэффициентов с опытными данными объемного паросодержания из некоторой базы данных.

Описание расчетных моделей для кодов RELAP5 и КОРСАР. Для моделирования эксперимента были созданы расчетные модели для программ RELAP5 и КОРСАР [5]. Обе модели включают в себя вертикальную трубу, поделенную на некоторое число расчетных ячеек по высоте (разбиение меняли в зависимости от длины трубы). На входе трубы обеспечивается постоянный расход воды заданной температуры. На рабочем участке задавали необходимое давление. По всей длине стенку рабочего участка моделировали цилиндрической тепловой структурой с заданным тепловыделением. С внутренней стороны тепловая структура омывалась потоком теплоносителя. На внешней поверхности тепловой поток принимался равным нулю, так как данных о тепловых потерях с поверхности рабочего участка нет.

Расчеты проводили при заданных постоянных граничных условиях (давлении на выходе из рабочего участка, температуре и расходе теплоносителя на входе в

него, тепловыделении в стенке трубы). Для всех вариантов эксперимента через 60 с после начала расчета параметры потока в каждой точке по длине рабочего участка стабилизировали. Достигнутые расчетные параметры стационарного состояния фиксировали (плотность теплоносителя, паросодержание, режим кипения и т.д.) в каждой расчетной точке по длине рабочего участка.

Результаты верификации моделей двухфазного потока кодов RELAP5 и КОРСАР. Для настоящего исследования выбрана база данных, полученная на стенде НИКИЭТа на трубах с использованием нейтронного датчика плотности. Опыты проведены на трубах внутренним диаметром 12 и 22 мм при равномерном тепловыделении на длине 1625 и 4500 мм и на трубе внутренним диаметром 14,6 мм при распределении тепловыделения по трубе на длине 3000 мм по закону усеченного косинуса с коэффициентом неравномерности 1,4. Эксперименты проведены в диапазоне давления 3—18 МПа, массовой скорости 500—3000 кг/(м²·с) и средней плотности теплового потока 0,25—3 МВт/м².

Нейтронный датчик перемещали вдоль трубы и фиксировали в контролируемых сечениях для проведения измерений. Время экспозиции составляло 100 с. Измерения проводили в стационарных условиях при неизменных давлении, расходе теплоносителя, плотности теплового потока и температуре теплоносителя на входе в экспериментальный участок. Сочетание этих параметров характеризовало серию опытов, переменной величиной в которой являлась температура на входе в экспериментальный участок. В результате измерений был получен систематизированный экспериментальный материал, на основе которого средствами Microsoft Access® собрана электронная база данных [5].

На первом этапе работы в результате обработки всех 3150 экспериментальных точек базы данных по стандартной версии исследуемых кодов была построена их генеральная совокупность для различных режимов течения пароводяной смеси. Выделенная таким образом совокупность (немногим более 1500 точек) для пузырькового и снарядного режимов течения при рассматриваемой скорости потока и диаметре труб соответствовала в расчетах области применения корреляции EPRI. На втором этапе работы для построенной генеральной совокупности была реализована рассматриваемая методика. При этом значения m и n были приняты равными 50. Было построено 50 репрезентативных выборок объемом 50 точек из генеральной совокупности экспериментальных точек. Для каждой из 50 выборок были проведены расчеты с вариацией коэффициентов C_0 и C_1 в диапазоне 0,8—1,4. Отметим, что коэффициенты C_0 и C_1 вводятся как относительные значения коэффициентов модели двухфазного потока по формулам

$$C_0^{\text{var}} = C_0 \cdot C_0^{\text{nom}}; \quad j_{gj}^{\text{var}} = C_1 \cdot j_{gj}^{\text{nom}},$$

где C_0 — параметр Зубера—Финдлея; j_{gj} — разность скоростей фаз; индекс nom относится к встроенной в код величине, индекс var — к реально принятому в расчетах значению.

Для сравнения результатов всех вариантных расчетов и эксперимента для каждой из выборок использовалось среднеквадратичное отклонение σ . Анализ зависимостей среднеквадратичного отклонения расчета от эксперимента доказывает, что

влияние коэффициента $C1$ на итоговый результат незначительно, коэффициента $C0$ — значимо. При этом для последнего были получены следующие статистические характеристики (см. таблицу).

Статистические характеристики коэффициента $C0$

Статистическая характеристика	RELAP5	KOPCAP
Среднее значение	1,028	1,026
Среднеквадратичное отклонение	0,025	0,036
Доверительный интервал для математического ожидания, построенный с надежностью 0,95	0,96—1,096	0,998—1,054

Таким образом, принятые в кодах RELAP5 и KOPCAP коэффициенты $C0$, равные 1, находятся внутри доверительного интервала для среднего оптимального значения этого коэффициента, что говорит о статистической верифицированности моделей двухфазного потока исследованных кодов на использованной базе данных по объемному паросодержанию в трубах.

Заключение. Представленная методология позволяет избежать субъективизма экспертной оценки согласия расчетов и экспериментов в процессе верификации теплогидравлических моделей обобщенных кодов. По разработанной методологии верифицированы модели двухфазного потока теплогидравлических кодов RELAP5 и KOPCAP на основе выполненных в НИКИЭТе экспериментов по определению объемного паросодержания в вертикальных трубах. Результаты анализа показали статистическое согласие расчетов по рассмотренным кодам с экспериментами. Важнейшим результатом работы стало определение доверительных интервалов для числовых коэффициентов встроенной в код модели, что является необходимой информацией при анализе неопределенности теплогидравлических расчетов [6].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Коваленко И.Н., Филиппова А.А. Теория вероятностей и математическая статистика. М.: Высшая школа, 1973.
2. Гмурман В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика. М.: Высшая школа, 2000.
3. RELAP5/MOD3 Code Manual. NUREG/CR-5535, 1995.
4. Юдов Ю.В. Двухфазная модель нестационарной контурной теплогидравлики и ее численная реализация в расчетном коде KOPCAP. — Теплоэнергетика, 2002, № 11, с. 17—21.
5. Мионов Ю.В., Радкевич В.Е., Журавлева Ю.В., Яшников Д.А. Верификация модели дрейфа кода RELAP5/MOD3.2 на базе данных по объемному паросодержанию в трубах. Тезисы семинара «Современное состояние развития программных средств для анализа динамики и безопасности АЭС». Саров, 2003, с. 48.
6. Афремов Д.А., Журавлева Ю.В., Мионов Ю.В., Радкевич В.Е. Методика статистического анализа неопределенностей теплогидравлических расчетов. — Атомная энергия, 2002, т. 93, вып. 2, с. 101—109.