УДК 621.039

Оценка неопределенностей замыкающих соотношений теплогидравлических моделей на основе локальных экспериментов

А. С. Грицай, Ю. А. Мигров

ФГУП «НИТИ им. А. П. Александрова», г. Сосновый Бор Ленинградской области, Россия

Аннотация

В статье рассматриваются актуальные проблемы оценки неопределенностей замыкающих соотношений теплогидравлических моделей, учитывая их эмпирическое (или полуэмпирическое) происхождение. Для решения этой задачи предлагается использовать методологию валидации программных средств на основе локальных теплофизических экспериментов. Предлагаемая методология включает в себя выбор экспериментов, установление ключевых замыкающих соотношений (ЗС), оказывающих решающее влияние на результаты расчета выбранных экспериментов, обоснование неопределенности доминантных ЗС путем серии расчетов. Приведены примеры оценки неопределенностей замыкающих соотношений теплогидравлической модели системного расчетного кода КОРСАР.

Ключевые слова: теплогидравлическая модель, замыкающие соотношения, оценка неопределенностей, локальные эксперименты, анализ чувствительности.

UDC 621.039

Assessing the uncertainty of closure relations in thermal-hydraulic models using separate-effects tests

A. S. Gritsai, Yu.A. Migrov

Alexandrov Research Institute of Technology (NITI), Sosnovy Bor, Leningrad region, Russia

Abstract

The paper discusses the problem of uncertainty assessment for closure relations in thermal-hydraulic models, considering their empirical (or semi-empirical) origin. To solve this problem, the authors propose a methodology of computer code validation using thermal separate effects tests. The proposed methodology involves selection of tests, identification of key closure relations that have a dominant effect on results of calculations for selected tests, and verification of the uncertainty of dominant closure relations by performing a series of calculations. To illustrate application of the methodology, uncertainty assessment of closure relations in the KORSAR code thermal-hydraulic model is presented as an example.

Key words: thermal-hydraulic model, closure relations, uncertainty assessment, separate effects tests, sensitivity analysis.

Введение

В настоящее время при расчетном обосновании безопасности атомных станций (АС) в соответствии с требованиями нормативных документов [1] необходимо выполнять оценку погрешности и неопределенности получаемых результатов расчета. Однако методологические аспекты проведения указанной оценки никак не регламентируются.

Как правило, для этого используют результаты оценки погрешности расчета важных для безопасности параметров, приводимые в аттестационном паспорте используемого программного средства (ПС).

Паспортные погрешности, в свою очередь, устанавливаются в процессе валидации ПС путем сравнения расчетных и экспериментальных данных и анализа максимальных расхождений между ними. Очевидно, что указанная процедура уже проходит в условиях действия неопределенностей: на результаты расчета влияют модельные неопределенности (нодализация объекта, параметры замыкающих соотношений), а на результаты эксперимента — инженерные (погрешности системы измерений, технологические отклонения и т. д.) и режимные неопределенности.

Серьезные проблемы переноса полученных результатов на натурный объект связаны также с так называемым масштабным фактором.

Данные обстоятельства ставят под сомнение правомерность прямого переноса паспортных погрешностей ПС на результаты расчета АС (за исключением тех, которые получены непосредственно на натурном объекте), поскольку формируемые на основе ПС расчетные модели в каждом конкретном случае обладают индивидуальным набором исходных неопределенностей и индивидуальной совокупностью проявляющихся в расчете физических процессов.

Один из способов решения проблемы заключается в выполнении процедуры оценки погрешности расчета по ПС с помощью статистических методов, в частности, методом GRS [2]. Данный метод основан на проведении многовариантных расчетов с разными комбинациями значений исходных неопределенностей и последующей статистической обработке совокупности результатов. В перспективе обсуждается возможность включения указанного метода в руководящие документы Ростехнадзора [3].

Вместе с тем, объективность результатов, получаемых с помощью метода GRS, определяется, главным образом, обоснованностью статистических характеристик исходных неопределенностей (диапазонов неопределенности и законов распределения). В этой задаче происходит логичное разделение сфер ответственности — характеристики неопределенностей инженерной группы предоставляют проектанты, а обоснование модельных неопределенностей ПС возлагается на разработчиков ПС.

Обоснование модельных неопределенностей может быть выполнено в рамках валидации ПС, однако это требует соответствующей эволюции как в методологии ее проведения, предполагающей применение статистических процедур, так и в представлении ее результатов.

В данной работе предлагается подобная методология, развиваемая разработчиками расчетного кода (РК) КОРСАР и основанная на применении анализа неопределенности и чувствительности (АНЧ). Также представлены результаты ее применения, полученные к настоящему времени.

Основные методологические задачи, требующие решения при валидации ПС на основе анализа неопределенности

Валидация в своей основе предполагает сопоставление результатов расчетов с соответствующими экспериментальными данными и оценку полученных расхождений. Если говорить о традиционной методологии валидации по результатам, например, локальных экспериментов, для которых характерна серийность реализации, то обычно погрешность оценивают по результатам расчета всей серии экспериментов. При этом определяется некий диапазон, характеризующий разброс расчетных значений по отношению к экспериментальным. Указанный подход, во-первых, не предполагает оценку неопределенности конкретных модельных параметров ПС, ответственных за расчет того или иного явления, а направлен на оценку совокупного влияния неопределенностей моделей ПС. Во-вторых, он не дает стати-

стической оценки неопределенности результатов расчета.

При валидации кода на основе анализа неопределенностей акцент делается на обоснование неопределенностей конкретных модельных параметров кода, в соответствии с этим, методологически она (валидация) предполагает решение следующих основных задач:

– формирование перечня модельных параметров ПС, относящихся к категории неопределенных и оказывающих влияние на результаты расчета критериев безопасности;

– обоснование статистических характеристик для каждого модельного параметра из сформированного перечня;

– проверка результирующего влияния неопределенностей модельных параметров на результаты расчета критериев безопасности.

По результатам валидации формируется перечень доступных для варьирования модельных параметров ПС с обоснованными для них статистическими характеристиками. Данный перечень предлагается включать, помимо прочих атрибутов, в аттестационный паспорт ПС.

Далее рассматривается технология решения указанных выше задач применительно к РК КОРСАР.

Методика формирования перечня модельных параметров ПС

К модельным параметрам ПС относятся, прежде всего, замыкающие соотношения (ЗС) блока контурной теплогидравлики. Поскольку данные соотношения получают на основе полуэмпирического подхода, то они являются одними из основных источников неопределенности (погрешности) расчета по ПС.

Формируемый перечень ЗС должен обеспечивать достаточную полноту их охвата с учетом значимости с точки зрения влияния на результаты расчета.

Обычно указанный перечень формируется на основе экспертного подхода, в частности, он был использован для РК КОРСАР на этапе освоения метода GRS. Данный перечень приведен в табл. 1.

Таблица 1

Перечень ЗС РК КОРСАР, учитываемых при выполнении анализа неопределенности результатов расчета методом GRS

№ AOUAS$	Наименование параметра	Значимость		
		ПСБ-ВВЭР	РУ с ВВЭР Большая течь	РУ с ВВЭР Обесточивание
Коэффициенты межфазного трения:				
1	- в пузырьковом и снарядном режимах	+	+	
2	- в дисперсно-кольцевом режиме			
3	- в дисперсном режиме			
4	- в обращенном кольцевом режиме			
5	- в режиме расслоенного течения			
Коэффициенты трения о стенку:				
6	- жидкой фазы в пузырьковом и снарядном режимах	+	+	
7	- газовой фазы в дисперсном режиме		+	

Окончание таблица 1

№ AOUAS$	Наименование параметра	Значимость		
		ПСБ-ВВЭР	РУ с ВВЭР Большая течь	РУ с ВВЭР Обесточиване
8	- жидкой фазы в дисперсно-кольцевом режиме			
9	- жидкой фазы в режиме расслоенного течения			
10	- газовой фазы в режиме расслоенного течения			
11	- газовой фазы в обращенном кольцевом режиме			
Коэффициенты межфазного теплообмена:				
12	- жидкой фазы в пузырьковом режиме ($T_f < T_s$)	+		
13	- жидкой фазы в снарядном режиме ($T_f < T_s$)			
14	- жидкой фазы в дисперсно-кольцевом режиме ($T_f < T_s$)			
15	- жидкой фазы в режиме расслоенного течения ($T_f < T_s$)			
16	- жидкой фазы в обращенном кольцевом режиме			
17	- жидкой фазы при $T_f > T_s$			
18	- газовой фазы в дисперсно-кольцевом режиме ($T_g > T_s$)			
19	- газовой фазы в режиме расслоенного течения ($T_g > T_s$)			
20	- газовой фазы в обращенном кольцевом режиме			
21	- газовой фазы в дисперсном режиме ($T_g > T_s$)		+	
Коэффициенты теплообмена со стенкой:				
22	- жидкой фазы в режиме докризисного кипения		+	
23	Доля теплового потока от стенки, идущая на генерацию пара в режиме докризисного кипения			
24	- жидкой фазы в режиме конвективного теплообмена	+	+	+
25	- жидкой фазы в режиме пленочной конденсации	+		
26	- жидкой фазы в дисперсном режиме			
27	Добавка к коэффициенту теплообмена жидкой фазы (усиление теплообмена) при повторном заливе вблизи фронта смачивания		+	
28	- газовой фазы в обращенном кольцевом режиме			
29	- газовой фазы в дисперсном режиме		+	
30	Критический тепловой поток			
31	Минимальная температура смачивания поверхности стенки	+		
32	Граничное объемное паросодержание перехода обращенного кольцевого режима течения в дисперсный			
33	Граничное объемное паросодержание перехода дисперсного режима течения в обращенный кольцевой		+	
34	Критическое массовое паросодержание в круглых трубах			
35	Критическое значение числа Вебера для расчета среднего диаметра капель в пузырьковом и снарядном режимах при течении в жидкости вертикальных каналах			
36	При большом градиенте паросодержания вдоль канала — составляющая коэффициента межфазного теплообмена со стороны недогретой жидкости, учитывающая естественную конвекцию			

Для возможности варьирования ЗС из указанного перечня в РК КОРСАР в программную часть кода, содержащую ЗС блока контурной теплогидравлики, введен вещественный массив AOUAS$. Каждый элемент указанного массива является множителем к ЗС (либо некоторой совокупности ЗС). Исходно все элементы массива инициализируются единицами. При необходимости имеется возможность из файла входных данных задавать, например, экспертно, отличные от единицы значения элементов этого массива, что, естественно, при-

водит к изменению значений соответствующих параметров при расчетах с помощью РК КОРСАР.

Вместе с тем, следует отметить, что экспертный подход сопряжен с субъективизмом оценок, что может приводить, в частности, к формированию неоправданно объемных перечней, при котором в них, из консервативных соображений, включаются малозначимые ЗС.

Выходом в такой ситуации может быть проверка значимости ЗС из сформированного экспертами перечня с помощью анализа чувствительности. С этой целью методом GRS для выбранных интегральных экспериментов либо перечня аварийных режимов выполняется анализ чувствительности результатов расчета наиболее важных критериев безопасности. Все параметры ЗС при этом варьируются в равных пределах, например, ±15 % от базового значения. По результатам анализа чувствительности выявляются ЗС, оказавшие наиболее значимое влияние на результаты расчета.

В качестве примера, в табл. 1 приведен результат подобного анализа, выполненный для трех динамических режимов. Анализировалось влияние ЗС, представленных в табл. 1, на максимальную температуру оболочки твэла (либо имитатора твэла). Значимые ЗС, проявившиеся в расчете, помечены знаком «+».

Обоснование статистических характеристик модельных параметров по результатам локальных стационарных экспериментов

Реальная возможность объективной оценки неопределенности, заложенных в РК ЗС, заключается в сопоставлении результатов расчетов, полученных с применением того или иного ЗС, с соответствующими статистически значимыми экспериментальными результатами.

В данной процедуре можно выделить три последовательных этапа:

1. **Выбор экспериментов**. Основные критерии выбора: статистическая значимость результатов, оценка погрешностей измерения параметров в экспериментах, локальный характер экспериментов (одно-два исследуемых явления в одном эксперименте), подробное описание стендовой установки, воспроизводимость эксперимента кодом на качественном уровне, широта охвата по режимным параметрам.

2. **Установление ключевых ЗС** (одного либо двух), оказывающих решающее влияние на результаты расчета выбранного эксперимента. Реализация данного этапа проводится с помощью анализа чувствительности (корреляционного анализа) результатов расчета кодом выбранного эксперимента к неопределенности ЗС. Важность данного этапа обусловлена необходимостью объективного установления доминантных ЗС в условиях их комплексной «работы» в составе кода с целью подтверждения правомерности переноса последующей статистической обработки расчетно-экспериментальных данных на выявленные ключевые ЗС.

3. **Обоснование неопределенностей доминантных ЗС**.

Для случая одного значимого ЗС выполняется серия расчетов с пошаговым изменением диапазона неопределенности доминантного ЗС (связанного с ним элемента AOUAS$), начиная от базового значения, равного 1. На каждом шаге определяется количество экспериментальных точек, попадающих в диапазон, определенный расчетом. По результатам строится эмпирическая гистограмма распределения, которая затем обрабатывается вероятностными методами. В результате устанавливается диапазон неопределенности ЗС (диапазон неопределенности расчета соответствующего модельного параметра), устанавливаемый по критерию попадания в него не менее 95 % экспериментальных точек, а также закон распределения в указанном диапазоне. Подобный частный случай детально изложен в [4].

Ситуацию с двумя независимыми значимыми ЗС можно рассматривать как вариант, в котором каждой паре возможных значений случайных величин X_1 и X_2 соответствует одно возможное значение величины Y, которой является исследуемый параметр. Действительно, при этом каждый вариантный расчет с использованием своей пары независимых случайных значений значимых ЗС (X_1 и X_2) дает единственное значение рассчитываемого параметра Y, количественно зависящее, при прочих равных условиях, только от значений X_1 и X_2. В этом случае математическая статистика определяет Y как функцию двух случайных аргументов $Y = f(X_1, X_2)$ [5]. Если исходить из принципа аддитивного влияния неопределенности (погрешности) X_1 и X_2 на неопределенность расчета параметра Y, то плотность распределения Y будет являться композицией X_1 и X_2. Известно, что если X_1 и X_2 являются независимыми случайными величинами с нормальным законом распределения, то их композиция также распределена нормально, причем, математическое ожидание (МО) и дисперсия (D) композиции равна сумме МО и D слагаемых [6]. Соответственно, для нормального распределения можно решить и обратную задачу — по известным характеристикам композиции и одного из рассматриваемых аргументов найти статистические характеристики второго аргумента. Поскольку распределение результатов измерений в теплофизических экспериментах, в большинстве случаев, соответствует нормальному закону, а число проявляющихся в локальных экспериментах явлений невелико, подобная ситуация является весьма распространенной.

По аналогии может быть решена и задача с несколькими значимыми ЗС в случае их попарной независимости. При этом обоснование неопределенности анализируемого ЗС проводится по результатам ранее выполненной оценки статистических характеристик прочих значимых ЗС. Таким образом, в рамках предлагаемого метода рекомендуется вначале использовать эксперименты, при расчете которых значимым является одно физическое явление и, соответственно, одно ЗС, с последующим переходом к общим ситуациям. Вместе с тем, использовать результаты экспериментов с проявлением множества значимых ЗС следует с осторожностью, поскольку при этом возможно накопление методической погрешности и ее перенос на определяемые характеристики искомого ЗС.

Далее представлены примеры, демонстрирующие описанный метод.

Случай одного значимого ЗС

При обосновании неопределенностей ЗС РК КОРСАР были, в частности, использованы результаты опытов по измерению величины коэффициента трения в гидродинамически гладких трубах в зависимости от числа Рейнольдса ($\lambda = f(Re)$), проведенных в Принстоне [6] и Орегоне [7]. Массив экспериментальных данных содержал 54 точки в диапазоне чисел Re от 2 227 до 35 540 000.

Результаты расчета данного параметра с помощью РК КОРСАР в сопоставлении с данными [6, 7] представлены на рис. 1 и демонстрируют хорошее воспроизведение кодом экспериментальных данных.

Установление доминантных ЗС, оказывающих наибольшее влияние на результаты расчета, осуществлялось с помощью анализа чувствительности результатов расчета к неопределенности ЗС РК КОРСАР. При этом варьировались все 36 ЗС РК КОРСАР в пределах ±15 % от базового значения. Инструментом анализа являлась программа ПАНДА (разработка ФГУП «НИТИ им. А. П. Александрова»). Результаты анализа представлены на рис. 2 в виде гистограммы коэффициентов ранговой корреляции Спирмена (КРКС), показывающих степень влияния варьируемого параметра (ЗС) на исследуемый процесс.

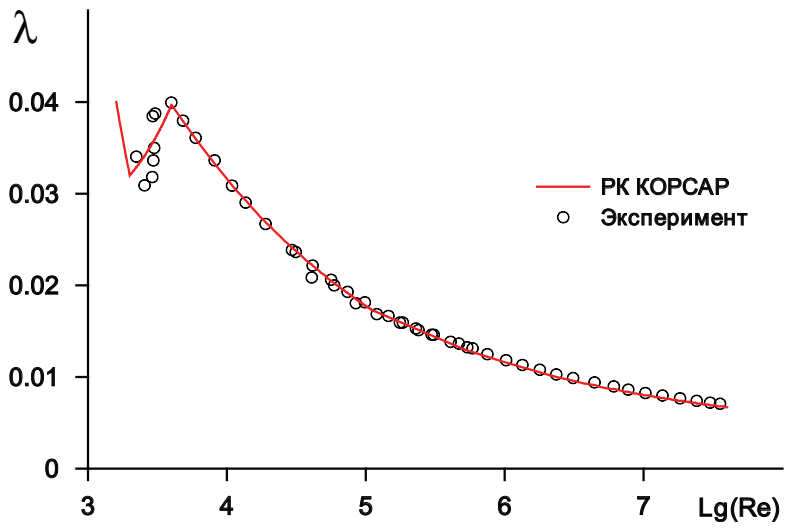

Рис. 1 — Сравнение расчетных (РК КОРСАР) и экспериментальных ([6, 7]) данных

Варьируемый параметр считается значимым, если для него |КРКС| > 0.3. С ростом |КРКС| степень влияния увеличивается. При |КРКС| = 1 можно говорить о полной взаимосвязи между параметрами. Как следует из рис. 2, из 36-ти анализируемых ЗС доминантным является 6-е (см. таблицу 1). Следовательно, можно выполнить обоснование неопределенности указанного ЗС, не опасаясь влияния прочих соотношений.

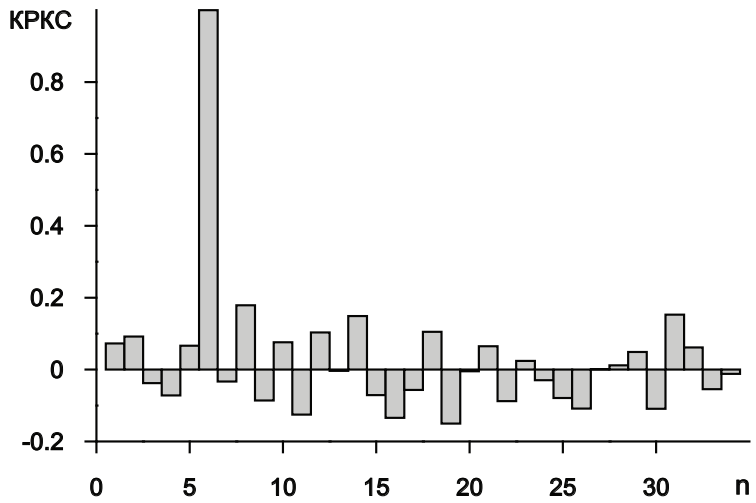

Рис. 2 — Результаты анализа чувствительности (одно значимое ЗС)

Данная процедура выполнялась следующим образом. Была выполнена серия вариантных расчетов с изменением базового значения ЗС № 6 равными шагами по 2 %, начиная от базового значения θ = 1.0 (AOUAS$(6) = 1.0÷1.02, 1.0÷0.98 и т.д.). На каждом шаге определялось количество экспериментальных точек, охватываемых полученным расчетным диапазоном. Сформированная таким образом выборка, плотность распределения *p(x)* которой в виде гистограммы представлена на рис. 3, обрабатывалась методами математической статистики. В результате для AOUAS$(6) были установлены следующие характеристики: МО = 1.013, среднеквадратическое отклонение σ = 0.03, а также (с помощью критерия согласия Пирсона) обоснован нормальный закон распределения. Диапазон неопределенности устанавливался на основе правила «двух сигм» и составил 0.953÷1.073.

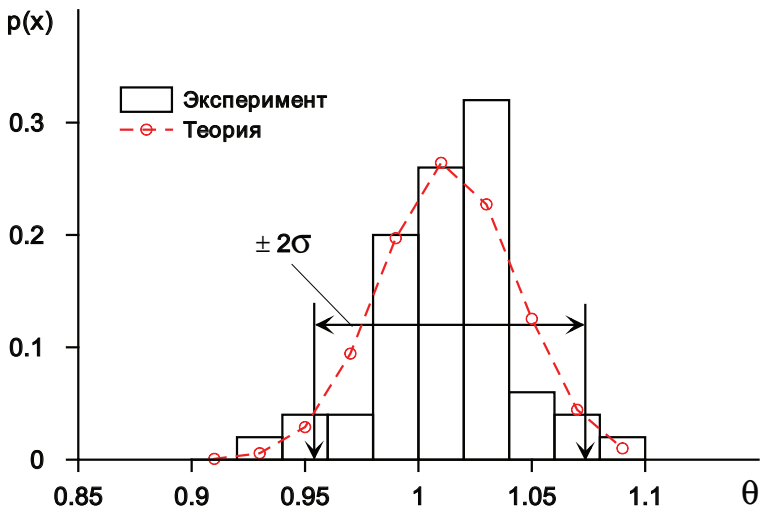

Рис. 3 — Результаты обработки сформированной выборки (случай одного значимого ЗС)

В РК КОРСАР для описания дисперсно-кольцевого режима используется модель раздельного трения фаз [8], предполагающая, что в контакте со стенкой находится лишь жидкая фаза. При этом, для расчета коэффициента трения жидкой фазы о стенку (ЗС № 8) в указанном режиме используются те же зависимости, что и для случая однофазного течения жидкости в канале с той разницей, что в качестве определяющего размера при вычислении Re жидкой пленки используется эквивалентный диаметр, зависящий от истинного объемного паросодержания, а в качестве скорости — скорость пленки.

В этой связи, исходя из особенностей модельного представления рассматриваемого процесса, можно принять допущение о возможности распространения полученных результатов оценки неопределенности ЗС № 6 на ЗС № 8.

Случай двух значимых ЗС

Подобная ситуация возникает при использовании в рамках рассматриваемого метода экспериментов по изучению пароводяных потоков, выполненных в ФЭИ [9, 10]. В указанных экспериментах, в частности, исследовалась зависимость истинного объемного паросодержания φ от относительной энтальпии потока x в вертикальной круглой трубе внутренним диаметром 17 мм. Измерения осуществлялись двумя способами: с помощью γ — просвечивания и методом изокинетического пробоотбора. Для анализа было отобрано 70 экспериментальных точек, полученных при давлениях P = 6.86 и 9.8 МПа; массовых скоростях ρw = 500, 750, 1000 кг/(с×м^2) и x = 0.1÷0.5.

Результаты расчета типичного эксперимента по РК КОРСАР представлены на рис. 4 и демонстрируют приемлемое качество воспроизведения кодом данных опыта.

Результаты анализа чувствительности, представленные в виде гистограммы значений КРКС 36-ти варьируемых параметров на рис. 5, позволили установить, что количественно результаты расчета данного режима в решающей степени определяются следующими параметрами (см. табл. 1):

– коэффициентом межфазного трения в дисперсно-кольцевом режиме (ЗС № 2);

– коэффициентом трения жидкой фазы о стенку в дисперсно-кольцевом режиме (ЗС № 8).

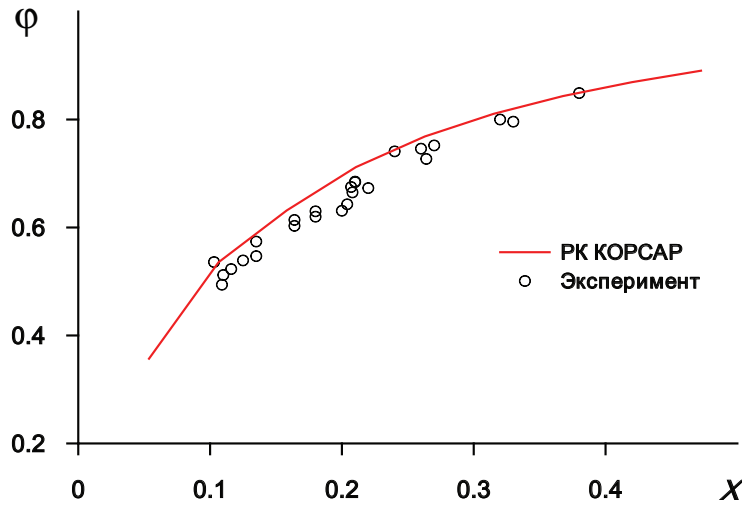

Рис. 4 — Сравнение результатов расчетов по РК КОРСАР с данными [10]

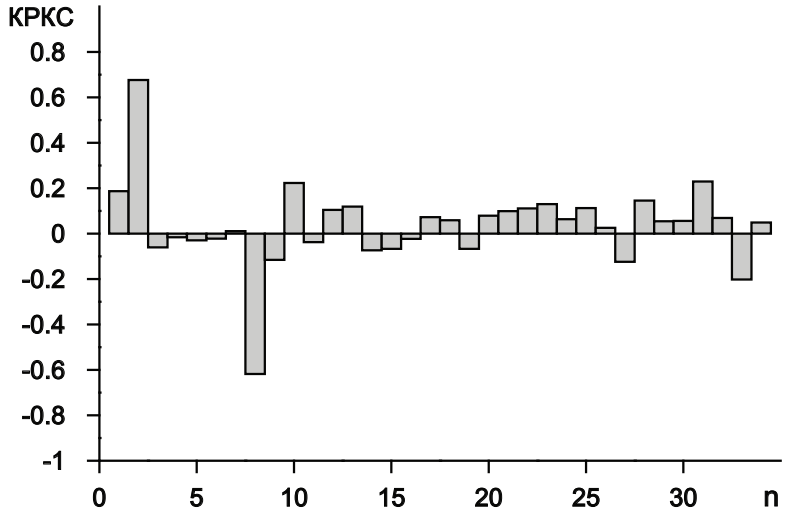

Рис. 5 — Результаты анализа чувствительности расчета φ для режимных параметров: p = 9.8 МПа; ρw = 1000 кг/(с×м²); x = 0.25

Оба параметра примерно в равной степени влияют на расчет истинного объемного паросодержания (|КРКС| ≈ 0.6), однако, с разной направленностью — увеличение межфазного трения влечет за собой рост φ, тогда как увеличение коэффициента трения жидкой фазы о стенку приводит к обратному эффекту.

Влиянием прочих варьируемых параметров на расчет φ можно пренебречь, поскольку для них значения КРКС, как следует из рис. 5, ниже порога значимости, соответствующего значению |0.3|.

Если принять предположение о независимости ЗС № 2 и ЗС № 8 как случайных величин (во всяком случае, в РК КОРСАР прямая функциональная связь между данными соотношениями отсутствует), то результаты расчета φ*(x)* можно рассматривать как функцию двух независимых случайных величин, статистические характеристики одной из которых (коэффициента трения жидкой фазы о стенку в дисперсно-кольцевом режиме — ЗС № 8) являются известными.

Для установления статистических характеристик композиции применялся методически тот же способ, что и в случае с одним значимым ЗС, со следующей особенностью: в вариантных расчетах, выполняемых для построения гистограммы плотности вероятности осуществлялось одновременное изменение диапазона неопределенности ЗС № 8 и ЗС № 2 (соответствующих AOUAS$(8) и AOUAS$(2)) с равным шагом 10% от базового значения, равного 1. На каждом шаге определялось количество точек, охватываемых расчетом. Сформированная таким образом гистограмма с результатами ее обработки представлена на рис. 6.

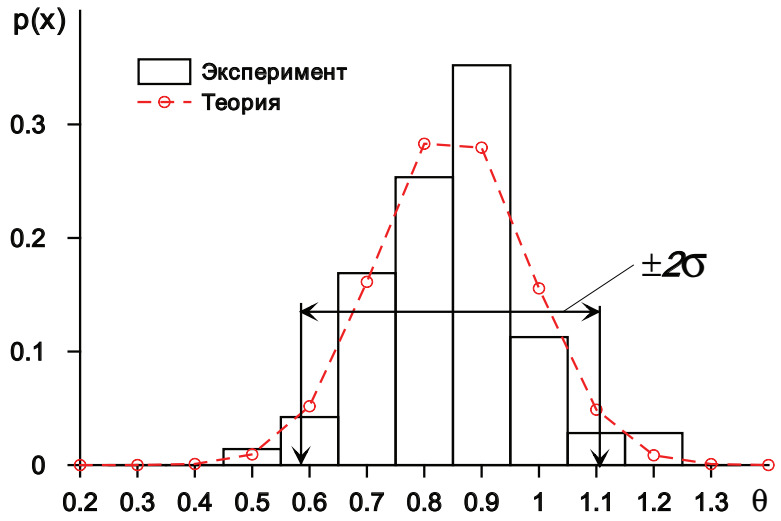

Рис. 6. Результаты обоснования статистических характеристик композиции

Было установлено, что плотность распределения композиции подчиняется нормальному закону с МО = 0.848 и σ = 0.132. Указанные данные позволили, в свою очередь, определить, искомые статистические характеристики ЗС № 2 (соответствующего ему множителя AOUAS$(2)): закон распределения — нормальный, МО = 0.835, σ = 0.128.

Результаты оценки неопределенности некоторых ЗС РК КОРСАР

Описанный метод был применен для обоснования статистических характеристик ряда модельных параметров РК КОРСАР. Результаты обоснования, полученные к настоящему времени, представлены в табл. 2. Полученные результаты могут быть использованы при выполнении анализа неопределенностей с помощью РК КОРСАР методом GRS.

Таблица 2

Статистические характеристики неопределенностей некоторых ЗС РК КОРСАР

Номер модельного параметра (AOUAS$) РК КОРСАР в соответствии с таблицей 1	МО	СКО	Закон распределения
2	0.835	0.128	Нормальный
6	1.013	0.03	
8	1.013	0.03	
23	1.3	0.172	
29	0.754	0.04	
34	0.976	0.038	

Проверка результирующего влияния неопределенностей модельных параметров на результаты расчета критериев безопасности

Для проверки результирующего влияния неопределенностей ЗС РК КОРСАР на расчет критериев безопасности был выбран режим РУ ВВЭР-1000 при аварии с большой течью холодной нитки петли теплообмена. В расчете была использована распределенная модель активной зоны (163 ТВС). Варьировались все параметры табл. 1 за исключением параметра № 31, поскольку вопросы как о допустимости варьирования данного параметра, так и о его диапазоне неопределенности в настоящее время находятся в стадии обсуждения специалистами. Неопределенности, относящиеся к категории инженерных, не учитывались.

Статистические характеристики варьируемых параметров ЗС принимались следующим образом:

– для обоснованных по изложенной в докладе методике в соответствии с табл. 2;

– для всех прочих экспертно принимался диапазон неопределенности ±15 % с нормальным законом распределения.

Результаты расчета максимальной температуры оболочки твэла в виде трубки неопределенности представлены на рис. 7 (базовый расчет показан красным цветом).

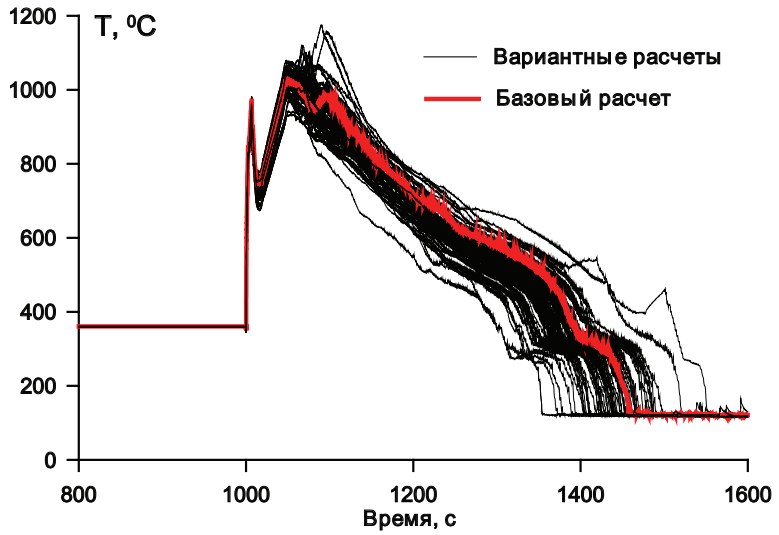

Рис. 7 — Результаты анализа неопределенности расчета максимальной температуры оболочки твэла при варьировании параметров ЗС РК КОРСАР

Из рис. 7 видно, что верхняя граница трубки неопределенности не превышает температуру 1200 °С.

Заключение

1. Предложена методология валидации ЗС РК КОРСАР на основе анализа неопределенностей, обеспечивающая возможность оценки статистических характеристик модельных параметров ПС.

2. Рассмотрены и на практических примерах продемонстрированы основные этапы реализации указанной концепции на примере РК КОРСАР.

3. Представлены результаты обоснования статистических характеристик некоторых ЗС РК КОРСАР, полученные к настоящему времени.

4. Проанализировано результирующее влияние неопределенностей модельных замыкающих соотношений РК КОРСАР на результаты расчета максимальной температуры оболочки твэла в аварии с большой течью РУ ВВЭР-1000.

Литература

1. НП-001-15. Общие положения безопасности атомных станций: утверждены Ростехнадзором 17 декабря 2015 г., введ. с 16 февраля 2016 г. М.: ФБУ «НТЦ ЯРБ», 2016.
2. Glaeser H. GRS Method for Uncertainty and Sensitivity Evaluation of Code Results and Applications // Science and Technology of Nuclear Installations. 2008. [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://dx.doi.org/10.1155/2008/798901. Загл. с экрана.
3. Об оценке погрешностей расчетов, выполняемых при обосновании безопасности объектов использования атомной энергии / С. Н. Богдан, О. М. Ковалевич, Н. А. Козлова, С. А. Шевченко, Д. А. Яшников // Ядерная и радиационная безопасность. 2017. № 2. С. 38–53.
4. Грицай А. С. Оценка неопределенностей моделей теплогидравлических расчетных кодов / А. С. Грицай, Ю. А. Мигров // Теплоэнергетика. 2015. № 9. С. 45–51.
5. Гмурман В. Е. Теория вероятностей и математическая статистика: учеб. пособие для вузов. М.: Высш. шк. 2003. 478 с.
6. Pipe flow measurements over a wide range of Reynolds number using liquid helium and various gases / C. J. Swanson, B. Julian, G. G. Ihas, R. J. Donnelly // J. Fluid Mech. 2002. Vol. 461. P. 51–60.
7. Friction factors for smooth pipe flow / B.J. McKeon, C. J. Swanson, M. V. Zaragola, R. J. Donnelly, A. J. Smith // J. Fluid Mech. 2004. Vol. 511. P. 41–44.
8. Юдов Ю. В. Замыкающие соотношения теплогидравлической модели расчетного кода КОРСАР / Ю. В. Юдов, С. Н. Волкова, Ю. А. Мигров // Теплоэнергетика. 2002. № 11. С. 22–29.
9. Измерение некоторых характеристик парожидкостного потока в круглой трубе при давлении 68.6 бар: препринт ФЭИ № ФЭИ-421 / П. Л. Кириллов, Н. М. Комаров, В. И. Субботин, И. П. Смогалев, М. Я. Суворов, Ю. Ю. Штейн, Р. В. Шумский, Ю. Д. Шиловский. Обнинск: ФЭИ, 1973. 104 с.
10. Результаты комплексных экспериментов по изучению гидродинамических характеристик дисперсно-кольцевого пароводяного потока высокого давления в трубе: препринт ФЭИ № ФЭИ-1447 / П. Л. Кириллов, Н. М. Комаров, М. Я. Суворов, И. П. Смогалев, Ю. Ю. Штейн, Р. В. Шумский. Обнинск: ФЭИ, 1983. 21 с.