

УДК 621.039.524:519.2

Анализ и оценка неопределенности корреляции Грюневельда-Стюарта для расчёта минимальной температуры смачивания поверхности стенки

А.С. Грицай

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

Аннотация

На основе сопоставления с результатами доступных экспериментов выполнена оценка неопределенности корреляции Грюневельда-Стюарта, используемой в программах для ЭВМ, предназначенных для теплогидравлических расчётов – расчётных кодах – в качестве замыкающего соотношения для расчёта минимальной температуры смачивания поверхности стенки. Показано, что для воды на линии насыщения и пароводяного потока указанная корреляция обеспечивает консервативный результат расчёта.

Проанализировано влияние методических положений и допущений, принятых при построении корреляции (неявных источников неопределенности), на количественные показатели разброса расчётных и экспериментальных данных (среднеквадратическое отклонение). По результатам математического анализа предложена модификация корреляции Грюневельда-Стюарта, позволяющая уменьшить отмеченный разброс для области недогретой воды.

Рассмотрена проблематика программно-технологической реализации учета неявных источников неопределенности многопараметрических замыкающих соотношений в расчётах с применением статистического метода GRS. Даны конкретные предложения по программному способу учета неопределенности рассматриваемой корреляции в функциональной части расчётного кода КОРСАР.

С применением расчётного кода КОРСАР и программы ПАНДА методом GRS выполнены расчётные исследования по оценке влияния неопределенности корреляции Грюневельда-Стюарта на результаты расчёта максимальной температуры оболочки твэлов в аварии с большой течью теплоносителя применительно к реакторной установке ВВЭР-1000. Установлено, что в данном аварийном режиме учет неопределенности анализируемой корреляции приводит к отклонениям в расчёте искомого параметра порядка 100 °С.

Ключевые слова: корреляция Грюневельда-Стюарта, минимальная температура смачивания стенки, расчётный код КОРСАР, неопределенность расчёта, LB LOCA, GRS.

UDC 621.039.524:519.2

Analysis and evaluation of Groeneveld-Stewart correlation uncertainty in calculation of minimum wall wetting temperature

A.S. Gritsai

FSUE “Alexandrov NITI”, Sosnovy Bor, Leningrad region, Russia

Abstract

Based on comparison with results of reported experiments, the author has performed an uncertainty evaluation of the Groeneveld-Stewart correlation that is used as a closure relation in computer programs designed for thermal-hydraulic calculations – computer codes – for

estimation of minimum wall-wetting temperature. The evaluation has shown that this correlation gives a conservative estimate of the mentioned parameter for the saturated water line and vapor-water flow.

The paper analyzes the influence that the correlation development methods and assumptions (indirect sources of uncertainty) have on quantified discrepancy of calculation and experiment (RMS deviation). Results of mathematical analysis are used to develop a modified Groeneveld-Stewart correlation that would reduce the discrepancy for the subcooled water region.

The paper addresses the problem of what software and technology should be used to account for indirect sources of uncertainty of multi-factor closure relations in calculations by the GRS statistical method. A specific proposal of how to include this correlation uncertainty calculation in the KORSAR functional software is made.

The KORSAR code and PANDA programs and GRS method have been used to analyze numerically the effect of the Groeneveld-Stewart correlation uncertainty on calculation of the peak-clad temperature for the VVER-1000 LB LOCA scenario. It is found that consideration of the correlation uncertainty in this scenario leads to about 100 °C deviation in the calculated parameter value.

Key words: Groeneveld-Stewart correlation, minimum wall wetting temperature, KORSAR computer code, calculation uncertainty, LB LOCA, GRS.

Введение

В современных российских федеральных нормах и правилах в области использования атомной энергии [1] установлено требование о том, что анализы безопасности атомных станций должны сопровождаться оценкой неопределенности получаемых результатов. Рекомендации о том, каким образом выполнять указанное требование приведены в Руководстве по безопасности [2]. Необходимость оценки связана с тем, что применяемые при анализах безопасности программные средства (ПС), такие как RELAP5 (США), ATHLET (Германия), CATHARE (Франция), расчётный код (ПК) КОРСАР (Россия), в своих моделях содержат большое количество соотношений, полученных полуэмпирическим путем [3]. Указанные соотношения предназначены для расчёта процессов массообмена, а также теплового и механического взаимодействия фаз между собой и со стенками канала и используются для замыкания базовой системы одномерных по пространству дифференциальных уравнений. Поскольку при разработке подобных замыкающих соотношений (ЗС) используются эмпирические константы, упрощения и допущения, они являются одним из основных источников погрешности расчёта и обуславливают модельную неопределенность кода.

С целью удовлетворения упомянутому требованию по оценке неопределенности используются два подхода. Первый из них предполагает прямой перенос на результаты расчёта погрешностей, представляемых в аттестационном паспорте программы для ЭВМ, второй – применение специальных методов, наиболее апробированным из которых является метод GRS [4], применяемый, в частности, в рамках методологии BEPU [5]. Правомерность применения первого подхода для теплогидравлических ПК в настоящее время признается спорной [6], [7], поэтому все большее внимание уделяется развитию и внедрению в практику метода GRS. Указанный метод основан на проведении многовариантных расчётов анализируемого режима со случайными наборами исходных параметров, относящихся к категории неопределенных, и последующей статистической обработке совокупности полученных результатов. При этом особую актуальность приобретает задача корректного обоснования статистических характеристик исходных данных (диапазонов варьирования и законов распределения в указанных диапазонах), поскольку от ее решения напрямую зависят результаты применения метода.

В связи с этим ведутся систематические работы по обоснованию неопределенности ЗС, используемых в РК, некоторые результаты которых опубликованы в [8, 9]. Настоящая статья является их логическим продолжением и посвящена оценке неопределенности корреляции Грюневельда-Стюарта (далее – корреляции G-S) [10], используемой в ряде ПС (TRACE, CATHARE, ATHLET, КОРСАР) для расчёта минимальной температуры смачивания стенки (T_{wmin}). Интерес к указанной корреляции обусловлен ее выраженным влиянием на результаты расчёта температуры оболочки твэлов в аварийных режимах РУ ВВЭР с потерей теплоносителя, в том числе, в режиме LB LOCA (Large Break Loss of Coolant Accident).

Феноменология явления

По физическому смыслу минимальная температура смачивания поверхности стенки – температура, при превышении которой предполагается прекращение контакта жидкой фазы с поверхностью стенки и формирование устойчивого пленочного кипения с сопутствующим резким ухудшением интенсивности теплообмена. Тепло передается за счёт конвекции к пару и далее, через межфазную поверхность, к жидкой фазе. При обратном процессе и снижении температуры стенки меньше T_{wmin} контакт жидкости со стенкой начинает восстанавливаться, причем, в случае реализации в эксперименте на поверхности стенки граничных условий второго рода, переходный режим быстро сменяется режимом пузырькового кипения (явление гистерезиса). Гидродинамический и иные механизмы данного явления подробно рассмотрены в [11].

Предварительный анализ корреляции

Корреляция G-S, предложенная в [10] и представляющая собой эмпирическое обобщение первичных экспериментальных данных по определению T_{wmin} методом «горячего пятна», определяется следующим соотношением:

$$T_{wmin} = \begin{cases} \text{При } x \leq 0 \text{ и } P \leq 9000 \text{ кПа:} \\ 284.7 + 0.0441 \cdot P - 3.72 \cdot 10^{-6} \cdot P^2 - \frac{x \cdot 10^4}{2.82 + 0.00122 \cdot P}; \\ \text{при } x > 0 \text{ и } P \leq 9000 \text{ кПа:} \\ 284.7 + 0.0441 \cdot P - 3.72 \cdot 10^{-6} \cdot P^2; \\ \text{при } P > 9000 \text{ кПа:} \\ (T_{wmin} - T_s)_{P=9000 \text{ кПа}} \cdot \left(\frac{P_{crit} - P}{P_{crit} - 9000} \right) + T_s. \end{cases} \quad (1)$$

В данном выражении x – относительная энтальпия потока, P – давление (кПа), T_s – температура насыщения (°C), P_{crit} – критическое давление (кПа).

Как следует из выражения (1), T_{wmin} в случае $x > 0$ является функцией давления, тогда как для области $x \leq 0$ вводится поправочный комплекс, представляющий собой двухпараметрическую функцию относительной энтальпии и давления. Существенного влияния массового расхода на T_{wmin} , как отмечают авторы [10], обнаружено не было.

На рис. 1 представлены результаты расчёта T_{wmin} по зависимости (1) для различных значений относительной энтальпии. Видно, что корреляция предполагает наименьшие значения T_{wmin} для насыщенной воды и пароводяной смеси (предельный вариант) с возрастанием по мере увеличения недогрева потока. При этом влияние недогрева в области низких давлений является особенно выраженным.

С точки зрения целей настоящей работы первоочередным является анализ базовых положений, принятых при построении корреляции G-S, поскольку от них в дальнейшем может зависеть как подход при оценке неопределенности корреляции, так и способ ее учёта. Указанный анализ был выполнен индивидуально для каждого из комплексов корреляции G-S, ответственных за расчёт T_{wmin} в областях $x > 0$ и $x \leq 0$.

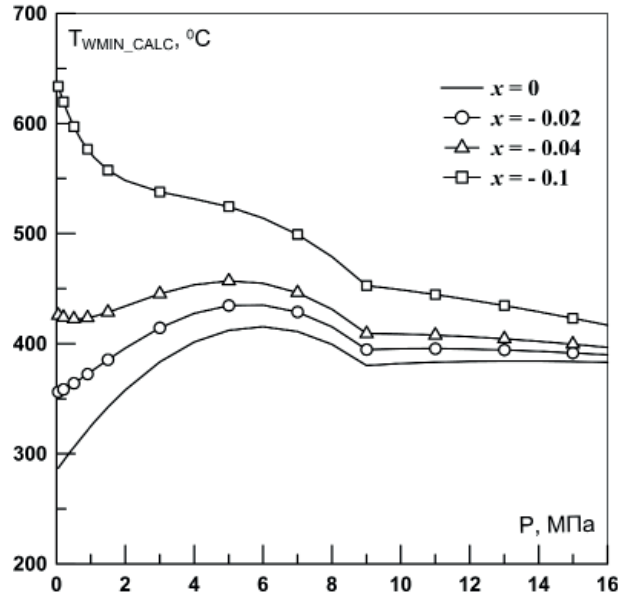


Рис. 1. Результаты расчёта T_{wmin} по корреляции G-S

Область $x > 0$

Совокупность экспериментальных данных [10] по определению T_{wmin} совместно с графиком корреляции G-S для $x > 0$ показаны на рис. 2 (для удобства визуального восприятия данные для области $x \leq 0$ обозначены чёрными маркерами, а для области $x > 0$ – красными), анализ которого позволяет предположить, что корреляция G-S для $x > 0$ является огибающей нижних границ экспериментальных диапазонов для соответствующих давлений.

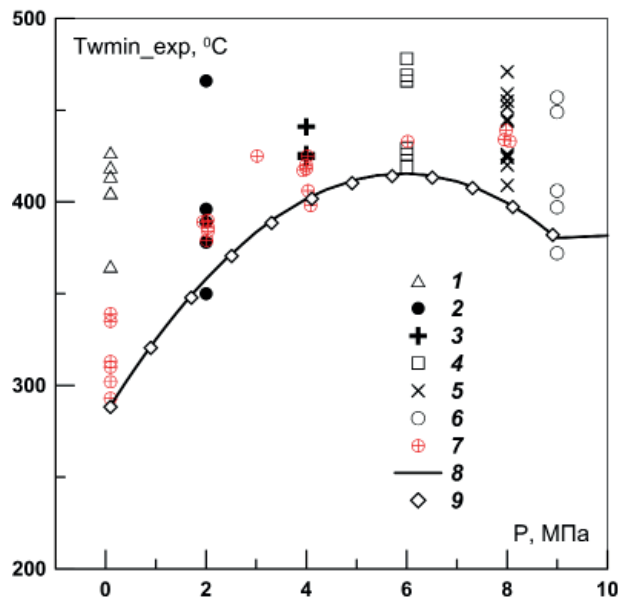


Рис. 2. К анализу корреляции G-S:

- 1 – $P = 0.2$ МПа, $x \leq 0$; 2 – $P = 2.0$ МПа, $x \leq 0$; 3 – $P = 4.0$ МПа, $x \leq 0$; 4 – $P = 6.0$ МПа, $x \leq 0$;
- 5 – $P = 8.0$ МПа, $x \leq 0$; 6 – $P = 9.0$ МПа, $x \leq 0$; 7 – $x > 0$; 8 – расчёт по корреляции G-S ($x > 0$);
- 9 – интерполяция методом МНК.

Для проверки указанного предположения методом наименьших квадратов (МНК) был построен интерполяционный полином (в предположении квадратичной зависимости) с использованием минимальных значений T_{wmin} для каждого диапазона. Константы полученного полинома полностью совпали с коэффициентами в корреляции G-S для случая $x > 0$ (1), а график самого полинома, как это видно из рис. 2, – с соответствующим графиком корреляции G-S.

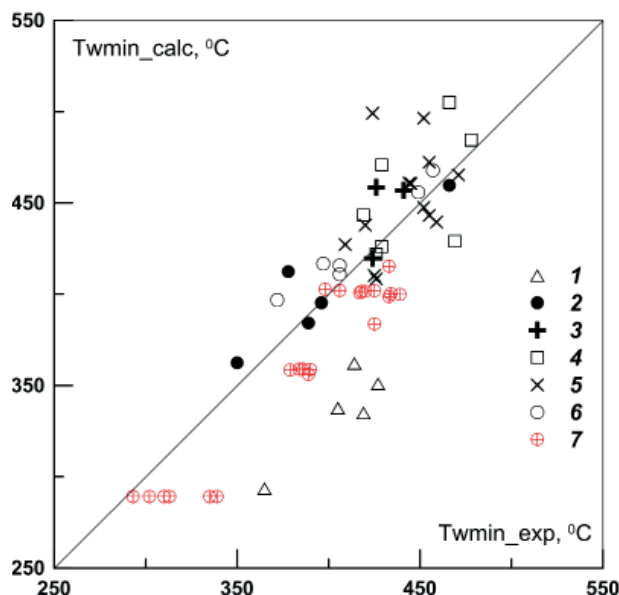


Рис. 3. Сопоставление результатов расчёта по корреляции G-S с экспериментальными данными (обозначения соответствуют рис. 2)

Полученный результат, в совокупности с данными, представленными на рис. 3, позволяет утверждать, что для случая $x > 0$ корреляция G-S обеспечивает консервативный подход при расчёте T_{wmin} .

Факт консервативности расчёта T_{wmin} для области $x > 0$ следует обсудить отдельно. С одной стороны, он вполне объясним, поскольку консервативная методология законодательно устанавливалась при разработке как теплогидравлических РК, так и ЗС для них в 70-х, 80-х годах. С другой стороны, необходимо принимать во внимание, что существенная часть упомянутых ЗС была в дальнейшем заимствована и использована в РК улучшенной (реалистичной) оценки. Эта тенденция прослеживается и при разработке РК нового поколения. В этой связи возникает вопрос о степени реалистичности (в противовес консервативным РК) получаемых с их помощью результатов. Соответственно, следует с осторожностью воспринимать стремление использовать методологию ВЕРУ (метод GRS совместно с РК улучшенной оценки) как способ получения консервативного результата (верхней границы диапазона неопределенности) – формальный подход здесь без всесторонней оценки неопределенности ЗС и иных неопределенных параметров может приводить к ошибкам.

Область $x \leq 0$

По результатам экспериментов [10] была установлена взаимосвязь роста T_{wmin} со снижением относительной энтальпии потока, что потребовало учета данного факта путем введения специальной аддитивной поправки:

$$-\frac{x \cdot 10^4}{2.82 + 0.00122 \cdot P} \quad (2)$$

В её основе лежит предположение о линейной функциональной взаимосвязи между T_{wmin} и x с монотонным изменением углового коэффициента функции в зависимости от давления.

В качестве интерполяционной функции, связывающей величину углового коэффициента с давлением, выбрана гипербола.

Как следует из рис. 3, корреляция G-S для диапазона давлений 2.0...9.0 МПа даёт средневзвешенное значение T_{wmin} в области $x \leq 0$ с заметной дисперсией относительно биссектрисы. Вместе с тем, из общей картины выпадает область низких давлений (0.2 МПа), в которой наблюдается систематическое завышение расчётных значений T_{wmin} относительно экспериментальных примерно на 80 °С.

Обсуждение методики обоснования неопределенности

Объективная оценка неопределенности ЗС требует сопоставления результатов расчётов, выполненных с его применением, с соответствующими экспериментальными данными.

При этом необходимо учитывать следующие аспекты:

- источник неопределенности ЗС (методические допущения, принимаемые при построении функциональной зависимости, погрешность измерения экспериментальных данных и т.д.);
- располагаемый объём экспериментальных данных;
- программно-технологический способ учёта неопределённости параметров ЗС в функциональной части РК;
- исключение разрывов в переходных областях при варьировании параметров ЗС.

Представленная информация предопределяет как выбор методического подхода при обосновании неопределенности ЗС – экспертного (при дефиците экспериментальных данных), либо статистического, так и конкретный вариант его реализации. В настоящей работе в допустимых случаях будут использованы элементы статистического подхода, обладающего наибольшей объективностью.

Наиболее удобно программно-технологическую реализацию учёта неопределенности ЗС в расчётах методом GRS осуществлять введением поправочного множителя к конкретному ЗС (или параметру ЗС), величина которого по умолчанию равна 1.0 (расчёт без отклонений) с возможностью варьирования в выбранном диапазоне [8]. Вместе с тем, применение такого подхода для корреляции G-S приводит к сомнительному результату. Так, например (рис. 2), для $x > 0$ умножение всего комплекса на 1.0...1.15 даёт разброс 45 °С при расчёте T_{wmin} для $P = 0.2$ МПа, а для $P = 6.0$ МПа – 60 °С, т.е., происходит увеличение погрешности с ростом давления и по экспертно выбранному закону (параболе), что трудно поддается физической интерпретации.

Представляется более логичным, используя аналогию аддитивной полосы погрешности экспериментальных измерений, исходить из предположения о независимости диапазона неопределенности расчёта T_{wmin} от давления. Действительно, погрешность измерения температуры в эксперименте может зависеть от абсолютного значения температуры, но не от давления.

Тогда в подобных случаях в состав ЗС для учёта неопределенности вместо общего поправочного множителя следует вводить специальную поправку-слагаемое и варьировать только её. При таком способе обеспечивается постоянство полосы неопределенности ЗС в диапазоне применимости по тем или иным режимным параметрам.

Как обсуждалось в предварительном анализе, в состав корреляции G-S входят два комплекса, учитывающие особенности расчёта T_{wmin} для областей $x > 0$ и $x \leq 0$ и построенные на основе различных подходов. В этой связи целесообразно неопределенность каждого комплекса оценивать отдельно, обеспечив при этом неразрывность расчёта T_{wmin} на границе областей.

Обоснование неопределённости корреляции G-S

Область $x > 0$ (насыщенная вода и равновесное кипение)

Для рассматриваемой области, вследствие ограниченного объёма экспериментальных данных, оценка неопределённости основывалась на упрощенных методах статистической обработки в совокупности со следующими допущениями:

1. Диапазон неопределённости расчёта T_{wmin} не зависит от давления (данный аспект обсуждался выше).
2. Нижней (консервативной) границей диапазона неопределённости расчёта T_{wmin} является базовая корреляция G-S. Основанием подобного допущения являются результаты предварительного анализа корреляции G-S, представленные выше.
3. Исходя из гипотезы о симметричности формы закона распределения погрешности измерения, подтверждающейся в большинстве практических случаев, границы диапазона неопределённости расчёта T_{wmin} принимались симметричными относительно центральной (медианной) кривой.
4. В качестве центральной кривой принималась смещенная вверх по оси ординат на величину среднего отклонения ($24.3\text{ }^{\circ}\text{C}$) относительно экспериментальных значений кривая оригинальной корреляции G-S для области $x > 0$ (таким образом, диапазон неопределённости с учётом п. 3) составил $48.6\text{ }^{\circ}\text{C}$).
5. Закон распределения в диапазоне неопределённости с учётом дефицита данных для его надёжной идентификации принят равномерным.

Изложенный подход, с одной стороны, гарантирует при выполнении вариантных расчётов методом ВЕРУ охват консервативной границы расчёта, а с другой – соответствует общепринятым методикам построения зависимостей и оценке их погрешностей по данным экспериментов [12].

Полученный диапазон неопределённости корреляции G-S для области $x > 0$ представлен на рис. 4 совместно с результатами оригинальных экспериментов.

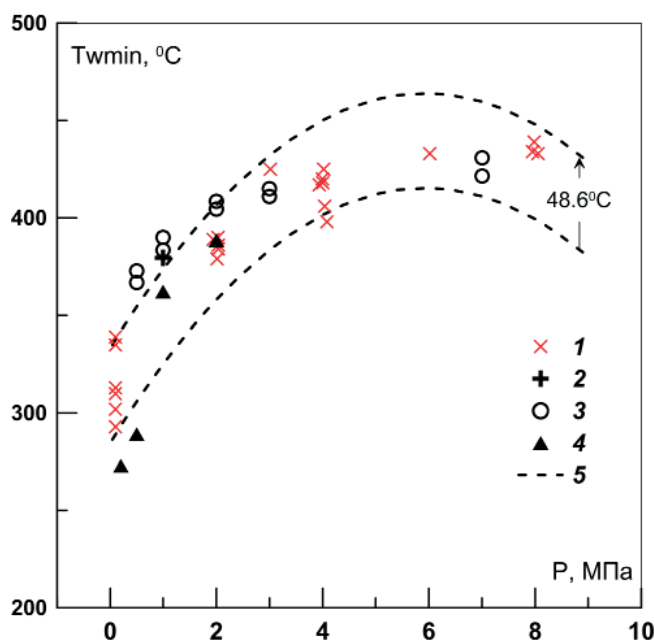


Рис. 4. Предлагаемый диапазон неопределённости корреляции G-S в сопоставлении с экспериментальными данными для области $x > 0$:

1 – данные Groeneveld, Stewart; 2 – JAERI (одиночный стержень); 3 – JAERI (сборка); 4 – Winfrith; 5 – Предлагаемый диапазон неопределённости.

Для проверки корректности полученного диапазона были использованы результаты экспериментов Японского научно-исследовательского института атомной энергии (JAERI) [13, 14] по измерению T_{wmin} при повторном заливе сборки стержней и единичного стержня, а также данные по T_{wmin} , полученные на установке Winfrith [15] (во всех случаях температура потока соответствовала линии насыщения). Указанные данные представлены на рис. 4 в виде средне-взвешенных значений. Видно, что предлагаемый диапазон неопределенности адекватно соотносится с результатами сторонних экспериментов.

С учетом изложенного, для учета неопределенности расчёта T_{wmin} в области $x > 0$ в корреляцию G-S предлагается ввести специальный комплекс с параметром A , представив ее следующим образом:

$$T_{wmin} = 48.6 \cdot (A - 1.0) + 284.7 + 0.0441 \cdot P - 3.72 \cdot 10^{-6} \cdot P^2 \quad (3)$$

Для удобства использования в расчётах методом GRS и сохранения подхода, при котором по умолчанию поправочные множители к ЗС равны 1.0, базовое значение параметра A также устанавливается равным 1.0, с диапазоном неопределенности [1.0; 2.0] и равномерным законом распределения.

Полученный диапазон неопределенности ~ 50 °С является достаточно широким и обусловлен, вероятно, не столько погрешностью измерения непосредственно температуры, сколько сложностью фиксации исследуемого феномена (начала смыва пленки пара и прекращения пленочного кипения), что привносит дополнительную неопределенность в получаемые результаты.

Обращает на себя внимание факт попадания в полученную полосу неопределенности значительного количества экспериментальных точек для случая $x \leq 0$ (рис. 4), что также говорит о трудностях надежного определения T_{wmin} в эксперименте. В связи с этим указанную полосу неопределенности, по сути, можно воспринимать как *переходную зону* между областями $x > 0$ и $x \leq 0$.

Область $x \leq 0$ (кипение недогретой воды)

Как отмечалось в ходе предварительного анализа, в данной области наблюдается заметный разброс экспериментальных значений относительно расчётных (рис. 3).

Анализ причин указанной дисперсии показал, что она обусловлена не только погрешностью (разбросом) экспериментальных данных, но и, в значительной мере, методическими допущениями, экспертно принятыми при построении самой корреляции.

Так, например, в настоящей работе была предпринята попытка в качестве интерполяционной функции-гиперболы, принятой в оригинальной корреляции, использовать степенную функцию вида $y = k \cdot x^a$, параметры k и a которой определялись на основе обработки первичных экспериментальных данных [10]. В итоге был получен следующий поправочный комплекс, для учета влияния недогрева потока¹:

$$-x \cdot 10^5 \cdot P^{-0.56} \quad (4)$$

Сопоставление результатов расчёта T_{wmin} для двух вариантов поправочных комплексов, представленное на рис. 5, показывает, что альтернативный вариант (4) позволяет заметно уменьшить разброс значений T_{wmin} – среднеквадратическое отклонение (СКО) составило

¹ При использовании (5), равно как и (3), целесообразно вводить ограничение $T_{wmin_max} \leq 1000$ °С, поскольку корреляция в области недогретого потока с уменьшением относительной энтальпии асимптотически стремится к бесконечности при $P \rightarrow 0$.

22.5 °С против 35.2 °С для оригинального варианта (2). Дальнейшее уменьшение дисперсии может быть обеспечено использованием для взаимосвязи между T_{wmin} и x при изменении давления иных, отличных от линейной, зависимостей.

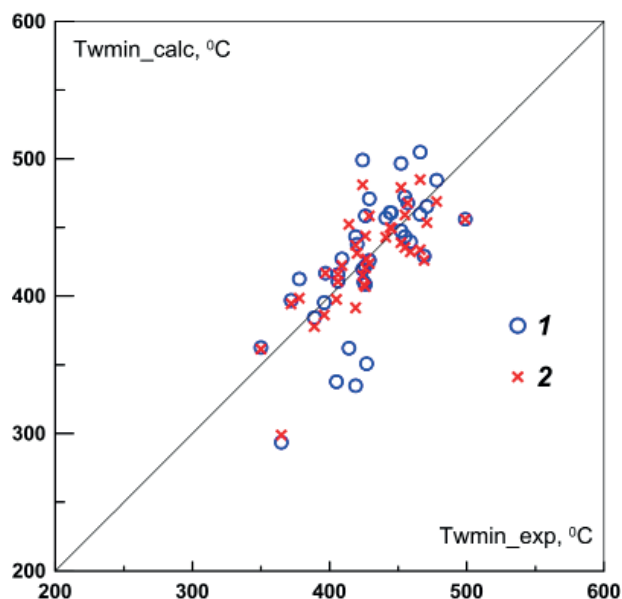


Рис. 5. Влияние выбора интерполяционного полинома на расчёт T_{wmin} в области $x \leq 0$:
1 – оригинальная поправка (3); 2 – альтернативная поправка (5).

Таким образом, в данном случае наглядно прослеживается влияние источников неопределённостей ЗС, относящихся к группе *неявных* – порождаемых методическими допущениями и упрощениями, постулируемыми при построении математических моделей тех или иных явлений (подробно вопросы классификации источников неопределённостей рассмотрены, например, в [16]).

Для оценки влияния на результаты расчёта неявных источников неопределённостей статистические процедуры непригодны. Единственный способ решения этой задачи заключается в выполнении расчётов с применением конкурирующих вариантов исходных зависимостей и последующем сравнении полученных результатов.

Более того, для имеющегося случая (область $x \leq 0$) учесть неопределённость любого из комплексов (2), (4) путём введения поправочного множителя либо слагаемого (по аналогии с тем, как это было сделано для области $x > 0$) не представляется возможным.

Действительно, для рассматриваемой области корреляция G-S является двухпараметрической и на координатной плоскости (T_{wmin} , P) может быть представлена в виде семейства кривых (рис. 1). Попытка организовать учет неопределенности путем смещения кривых по оси ординат случайным образом в пределах некоторого диапазона, как это было реализовано для случая $x \geq 0$, повлечет заведомо неверный результат с попаданием в консервативную область при $x \rightarrow 0$, либо к скачкам при переходе от $x = 0$ к недогретой воде.

Продемонстрируем это конкретным примером. Используем в качестве диапазона неопределенности оригинальной корреляции G-S (1) для области $x \leq 0$ разброс точек вокруг биссектрисы на рис. 5. Рассчитанное ранее значение СКО составило 35.2 °С. Исходя из правила «двух сигм», диапазон неопределенности составит ± 70.4 °С. Тогда (рис. 1), при $P = 9.0$ МПа и $x = -0.01$ данный диапазон перекроет не только область вплоть до $x = -0.1$, но и существенную часть области ниже кривой $x = 0$, что явно противоречит данным опыта.

Рассмотренная ситуация является характерной для эмпирических многопараметрических за-

висимостей, при разработке которых выбор базовой функции (или функций) и подбор констант осуществляется по критерию минимального расхождения расчётных и экспериментальных данных («стягивание» экспериментальных точек вокруг биссектрисы, как это показано на рис. 5).

Однако уже двухпараметрическая зависимость представляет собой достаточно сложную поверхность в пространстве определяющих параметров (в нашем случае – $T_{wmin} = f(P, x)$), и попытка использовать в составе подобных зависимостей какие-либо сторонние поправочные множители повлечёт ее серьёзную деформацию, либо нарушит исходную логику ее построения и принесет лишь дополнительную погрешность в результаты расчёта.

В этой связи, при оценке неопределённости многопараметрических зависимостей особое внимание следует уделять неявным источникам неопределённости и проявлять осторожность в случае необходимости ввода каких-либо поправочных коэффициентов.

Обобщая итоги выполненного анализа, для учета неопределённости корреляции G-S в расчётах с применением метода GRS предлагается следующий алгоритм. Для области $x > 0$ используется соотношение (3) с поправочным параметром A . Для области $x \leq 0$ учитывается влияние только неявных источников неопределённости путем сопоставления результатов расчётов, полученных с использованием в составе корреляции G-S соотношений (2) и (4) (или иных альтернативных). При этом для исключения скачков в вычислении T_{wmin} при переходе от области $x \leq 0$ в область $x > 0$ вводится условие, согласно которому расчётное значение T_{wmin} в области $x < 0$ не может быть меньше T_{wmin} при $x = 0$.

Оценка влияния неопределённости корреляции G-S на расчёт температуры твэлов в аварии LB LOCA

С применением РК КОРСАР [17] и программы ПАНДА методом GRS были выполнены расчётные исследования по анализу влияния неопределённости корреляции G-S на результаты расчёта максимальной температуры оболочки твэлов ($T_{clad max}$) в аварии LB LOCA (разрыв холодной нитки одной из циркуляционных петель в неотсекаемой части) применительно к РУ ВВЭР-1000. Использовалась расчётная модель РУ с распределённой (многоканальной) теплогидравлической моделью активной зоны и точечной нейтронной кинетикой. При проведении расчётов варьировались только параметры неопределённости корреляции G-S.

Для учёта влияния неявных источников неопределённости были проведены две серии вариантных расчётов, в первой из которых, наряду с варьированием в установленных пределах параметра A , использовался исходный поправочный комплекс (2); во второй – применялся альтернативный комплекс (4). Полученные диапазоны неопределённости расчёта $T_{clad max}$ совместно с базовыми расчётами (без варьирования параметра A) представлены на рис. 6, *a*, *б*, соответственно. Дополнительно на указанных рисунках отображены границы диапазона неопределённости $T_{clad max}$ с принимавшимися ранее экспертно (на этапе освоения и отработки метода GRS) параметрами неопределённости корреляции G-S $\pm 15\%$ и без учёта неявной составляющей. Моменту начала аварийного процесса соответствует 1000-я секунда от начала расчёта.

Как следует из представленных рисунков, в течение первых 50 секунд от начала аварийного процесса базовые кривые $T_{clad max}$ ведут себя идентично. Пиковые значения температур в базовых расчётах также близки и составляют ~ 1020 °С. Различие начинает проявляться на этапе устойчивого расхолаживания, в ходе которого вариант *б*) с использованием поправочного комплекса (4) даёт несколько более высокие температуры по сравнению с вариантом *а*).

Однако расчёт *б*) является более реалистичным, поскольку рассматриваемая фаза аварийного процесса протекает в области параметров $P = 0.2 \dots 0.25$ МПа и $x \leq 0$, при сочетании ко-

торых корреляция G-S с альтернативным комплексом (4) обеспечивает лучшее согласование расчётных и экспериментальных данных по T_{wmin} (рис. 3, 5) по сравнению с (2). Данное обстоятельство следует принимать во внимание при проведении расчётных анализов схожих по физике аварийных режимов в детерминистической постановке.

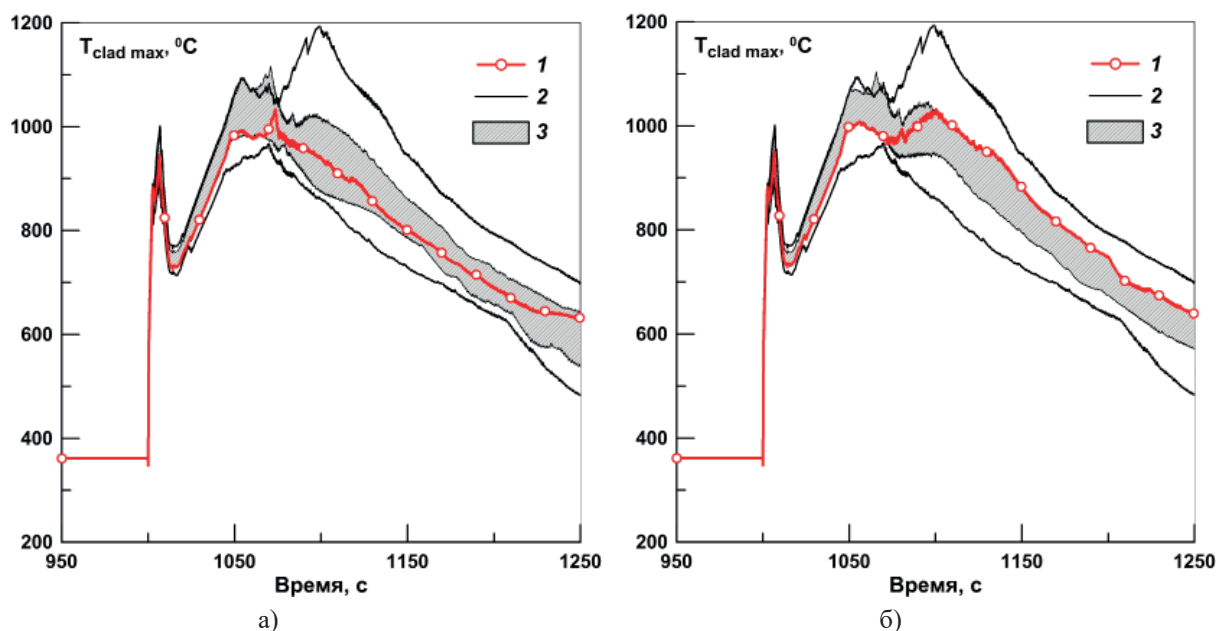


Рис. 6. Влияние неопределенности оригинальной корреляции G-S (а) и ее модифицированного варианта (б) на результаты расчёта максимальной температуры оболочки твэлов в аварийном режиме LB LOCA.

1 – базовый расчёт; 2 – экспертно принимаемые параметры неопределенности корреляции G-S $\pm 15\%$;
3 – параметры неопределённости корреляции G-S, установленные в настоящей работе.

Параметры диапазонов неопределённости $T_{clad\ max}$ (ширина, поведение верхней границы) в рассматриваемых вариантах достаточно близки. Разброс расчётных значений $T_{clad\ max}$ составляет порядка $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ в моменты пиковых значений. Вместе с тем, как максимальные значения, так и ширина диапазонов $T_{clad\ max}$, полученные по методике настоящей работы, существенно меньше аналогичных параметров, полученных ранее на основе экспертных оценок по неопределённости корреляции G-S, что говорит об их излишнем консерватизме.

Представленные результаты можно рассматривать как аргумент в пользу ревизии ряда ЗС, используемых в составе ПС, и уточнения параметров их неопределённости. Этот вывод подтверждается результатами недавней работы [18], где убедительно доказана необходимость коррекции таблиц критического теплового потока в области высоких и низких давлений.

Заключение

1. На основе анализа и сопоставления с экспериментальными данными оценена неопределённость параметров корреляции Грюневельда-Стюарта для расчёта минимальной температуры смачивания поверхности стенки.
2. Показано, что для многофакторных зависимостей, в том числе для корреляции Грюневельда-Стюарта, весомый вклад в погрешность расчёта вносят неявные источники неопределённости.
3. Предложена модификация корреляции Грюневельда-Стюарта для расчёта T_{wmin} в области $x \leq 0$.
4. С помощью метода GRS проанализировано влияние неопределённости корреляции на

результаты расчёта максимальной температуры оболочки твэлов в аварийном режиме LB LOCA РУ ВВЭР.

5. Результаты работы могут быть полезны специалистам проектных и научных организаций, использующих расчётный код КОРСАР (и иные программы для ЭВМ, содержащие в своем составе корреляцию Грюневельда-Стюарта) в расчётах совместно с анализом неопределённостей, а также в методологической части при проведении валидации программ для ЭВМ с использованием теплогидравлических экспериментов по отдельным процессам и явлениям в соответствии с рекомендациями Ростехнадзора.

Литература

1. Общие положения обеспечения безопасности атомных станций: НП-001-15: утверждены Ростехнадзором 17 декабря 2015 г., введ. с 16 февраля 2016 г. – М.: ФБУ «НТЦ ЯРБ», 2016.
2. Рекомендации по оценке погрешностей и неопределенностей результатов расчётных анализов безопасности атомных станций: руководство по безопасности (РБ-166-20): утверждено Ростехнадзором 30 июля 2020 г. – М.: ФБУ «НТЦ ЯРБ», 2020.
3. *Кузнецов Ю.Н.* Теплообмен в проблеме безопасности ядерных реакторов. – М.: Энергоатомиздат, 1989.
4. *Glaeser H.* GRS Method for Uncertainty and Sensitivity Evaluation of Code Results and Applications // Science and Technology of Nuclear Installation. – 2008. – URL: <http://dx.doi.org/10.1155/2008/798901>. – Загл. с экрана. – Электронный ресурс.
5. Best estimate safety analysis for nuclear power plants: uncertainty evaluation: Safety report series // International Atomic Energy Agency. – Vienna, 2008. – ISSN 1020-6450. № 52.
6. *Грицай А.С.* Оценка неопределенностей замыкающих соотношений теплогидравлических моделей на основе локальных экспериментов / А.С. Грицай, Ю.А. Мигров // Технологии обеспечения жизненного цикла ядерных энергетических установок. – 2019. – № 2(16). – С. 9–20.
7. Об оценке погрешностей расчётов, 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.
8. *Грицай А.С.* Оценка моделей теплогидравлических расчётных кодов / А.С. Грицай, Ю.А. Мигров // Теплоэнергетика. – 2015. – № 9. – С. 45–51.
9. *Грицай А.С.* Развитие метода обоснования неопределенностей моделей, используемых в теплогидравлических расчётных кодах / А.С. Грицай, Ю.А. Мигров // Теплоэнергетика. – 2019. – № 5. – С. – 25–31.
10. *Groeneveld D.C.* Stewart J.C. The minimum film boiling temperature for water during film boiling collapse/ D.C. Groeneveld, J.C. Stewart // Proc. 7th International Heat Transfer Conference, Munich, FRG. – 1982. – Vol. 4. – P. 393–398.
11. *Кириллов П.Л.* Тепломассобмен в ядерных энергетических установках / П.Л. Кириллов, Г.П. Богословская. – М.: Энергоатомиздат, 2000. – 456 с.

12. *Новицкий П.В.* Оценка погрешностей результатов измерений / П.В. Новицкий, И.А. Зограф. – Л.: Энергоатомиздат, 1991.
13. High-Pressure Reflooding Experiments of Multi-Rod Bundle at ROSA-IV TPTF / Y. Koizumi [et al.] // Nuclear Engineering and Design. – 1990. – V.120. – P. 301–310.
14. *Xu G.* Reflood Experiments in Single Rod Channel Under High-Pressure Condition / G. Xu, H. Kumamaru, K. Tasaka // Japan Atomic Energy Research Institute, JAERI-M. – 1989. – P. 89–178.
15. *Swinnerton D.* Steady State Post Dryout Experiments at Low Quality and Medium Pressure / D. Swinnerton, K.G. Pearson, M.L. Hood // United Kingdom Atomic Energy Authority, AEEWR 2192, 1988.
16. *Петкевич И.Г.* Разработка методики реалистичных расчётов с анализом неопределённостей для динамических процессов на РУ ВВЭР с использованием трёхмерной кинетики: дисс. канд. техн. наук. – М.: ОКБ «Гидропресс», 2013.
17. Официальный сайт РК КОРСАР. Расчётный код улучшенной оценки [Электронный ресурс]. – URL: <https://rk-korsar.ru> (дата обращения: 12.07.2020).
18. *Минко М.В.* Кризис кипения насыщенной воды в трубах при высоких давлениях / М.В. Минко, В.В. Ягов, С.С. Савекин // Теплоэнергетика. – 2020. – № 6. – С. 28–34.