

РАЗВИТИЕ МЕТОДА ОБОСНОВАНИЯ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЕЙ МОДЕЛЕЙ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ В ТЕПЛОГИДРАВЛИЧЕСКИХ РАСЧЕТНЫХ КОДАХ

© 2019 г. А. С. Грицай^a, *, Ю. А. Мигров^a

^aНаучно-исследовательский технологический институт им. А.П. Александрова,
188540, Россия, Ленинградская обл., г. Сосновый Бор, Копорское шоссе, д. 72

*e-mail: ansg_m@mail.ru

Поступила в редакцию 27.07.2018

После доработки 20.10.2018

Принята к публикации 31.10.2018

Статья посвящена одному из наиболее ответственных и, вместе с тем, проблемных этапов реализации анализа неопределенностей теплогидравлических расчетов методом GRS – обоснованию статистических характеристик модельных неопределенностей, а именно неопределенностей замыкающих соотношений блока контурной теплогидравлики. Указанные соотношения, разрабатываемые, как правило, на основе полуэмпирического подхода, являются одними из главных источников неопределенности получаемых с помощью кода результатов расчета. Поставлена задача развития предложенного ранее авторами метода, позволяющего выполнять указанную процедуру обоснования с применением технологии верификации и с привлечением объективных статистических критериев. Метод позволяет перейти от экспертной к объективной оценке неопределенностей модельных параметров и тем самым повысить объективность результатов расчетов, получаемых в рамках метода GRS. Сформулированы конкретные задачи, решение которых позволяет расширить возможности метода в части использования привлекаемой экспериментальной информации, а также при оценке неопределенности модельных параметров, прямое измерение которых в эксперименте не представляется возможным. Это, в свою очередь, дает возможность использовать метод для обоснования неопределенности всех наиболее важных модельных параметров расчетного кода. Последовательно изложены этапы предлагаемого метода с обсуждением возникающей на каждом этапе актуальной проблематики. На практических примерах продемонстрированы способы решения сформулированных задач. Представлены результаты применения метода для оценки неопределенности ряда модельных параметров (замыкающих соотношений) теплогидравлического расчетного кода KORCAP. Указанные результаты рекомендуются к использованию при выполнении анализа неопределенностей с помощью расчетного кода KORCAP методом GRS. Вместе с тем, предлагаемый метод может быть использован и для других расчетных кодов.

Ключевые слова: теплогидравлический расчетный код, замыкающие соотношения, метод GRS, статистика, анализ неопределенностей, анализ чувствительности, закон распределения, расчетный код KORCAP

DOI: 10.1134/S0040363619050047

В настоящее время в мировой и отечественной практике обоснования безопасности объектов использования атомной энергии (ОИАЭ) в той или иной степени учитывается требование оценки неопределенности результатов расчетного анализа. В отечественных нормативных документах подобное требование сформулировано в [1].

Необходимость оценки неопределенности связана, в частности, с тем, что используемые при анализе безопасности ОИАЭ теплогидравлические расчетные коды (РК), в том числе улучшенной оценки (Best Estimate), такие как RELAP5

(США) [2], ATHLET (Германия) [3], CATHARE (Франция) [4], KORCAP (Россия) [5], в своих моделях используют большое количество полуэмпирических соотношений [6, 7]. Эти соотношения описывают локальные физические процессы (тепловое и механическое взаимодействие фаз и т.д.) и необходимы для замыкания базовой системы дифференциальных уравнений. В связи с тем что при разработке подобных замыкающих соотношений (ЗС) используются методические упрощения и допущения, а также эмпирические константы, полученные при обобщении экспериментальных данных, ЗС являются источником

погрешности (неопределенности) расчета и обусловливают модельную неопределенность кода.

К настоящему времени предложен и апробирован широкий спектр методов анализа неопределенности и чувствительности (АНЧ) результатов расчетов, выполняемых с использованием РК [8], при этом наибольшее распространение получил метод GRS [9–11]. Метод основан на проведении многовариантных расчетов с варьированием параметров модели в их диапазонах неопределенности и последующей статистической обработке совокупности результатов. При этом модельные неопределенности рассматриваются как непрерывные случайные величины с некоторым законом распределения в заданном диапазоне. Число вариантов расчетов определяется соотношением Уилкса [12]. Решение о включении в руководящие документы Ростехнадзора требования (или рекомендации) о применении указанного метода при проведении анализов безопасности ОИАЭ находится в стадии обсуждения [13].

Одним из основных этапов метода GRS, напрямую влияющих на результаты анализа (ширину интервалов возможного изменения исследуемых параметров, важных для безопасности), является обоснование количественных характеристик входных (модельных) параметров – диапазонов их неопределенности и законов распределения в указанных диапазонах. В этой связи следует отметить, что в настоящее время отсутствует в необходимой мере отработанный и универсальный метод, позволяющий на базе объективных критериев обосновывать (оценивать) статистические характеристики неопределенностей модельных параметров РК. Существующие аналитические подходы [14] не всегда пригодны для задач теплогидравлики либо предлагаются для частных задач [15], а наиболее распространенный экспертный способ соединен с неизбежным субъективизмом оценок.

Один из методов оценки модельных неопределенностей РК, опирающийся на статистические закономерности, предложен авторами в [16]. Однако его универсальность ограничивалась следующими обстоятельствами:

исключалось привлечение для оценки модельных неопределенностей результатов экспериментов, в которых фиксируются несколько физических явлений;

отсутствовала возможность оценки неопределенности ЗС, ответственных за расчет параметров, прямое измерение которых в опыте не представляется возможным (прежде всего, коэффициентов, определяющих интенсивность межфазного взаимодействия).

В связи с этим была поставлена задача дальнейшего развития метода в целях преодоления отмеченных ограничений.

ПРОГРАММНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ УЧЕТА МОДЕЛЬНЫХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЕЙ

Для учета модельных неопределенностей при выполнении АНЧ в рамках метода GRS необходимо обеспечить доступ к соответствующим ЗС кода. В РК KORCAP данная задача решена вводом в программную часть кода, содержащую ЗС блока контурной теплогидравлики, вещественного массива AOUASS\$. Каждый элемент указанного массива является множителем к ЗС (либо системе ЗС), используемому для расчета конкретного параметра. Исходно все элементы массива инициализируются единицами. При необходимости имеется возможность из файла входных данных задавать отличные от единицы значения элементов массива, влияя таким образом на расчет соответствующего параметра с использованием того или иного ЗС. Описанный способ не требует перетрансляции кода при выполнении многовариантных расчетов, что технически существенно упрощает процедуру выполнения АНЧ.

Всего в РК KORCAP имеется возможность варьирования 34 параметров, перечень которых с соответствующими им номерами элементов массива AOUASS\$ приведен в [16].

ОПИСАНИЕ МЕТОДА

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 соответствии с этим метод основан на применении технологии верификации в совокупности с законами математической статистики и содержит три последовательных этапа.

1. Выбор экспериментов. Основные критерии выбора: статистическая значимость результатов, локальный характер экспериментов (одно–два исследуемых явления в одном эксперименте), подробное описание, воспроизводимость эксперимента кодом на качественном уровне, широта охвата по режимным параметрам. Отдельно необходимо оговорить требование оценки погрешности используемых экспериментальных данных. При наличии информации о погрешности ее следует учитывать в получаемых диапазонах неопределенности оцениваемых параметров (добавлять

к ним). При отсутствии подобной информации (что является достаточно распространенным случаем) целесообразно использовать экспериментальные данные по соответствующему явлению, полученные разными авторами, что позволит уточнить диапазоны неопределенности.

2. Установление ключевых ЗС (одного либо двух).

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, а также потребностью обосновать правомерность переноса последующей статистической обработки расчетно-экспериментальных данных на выявленные ключевые ЗС (результаты этапа 3).

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, полученный расчетом. По результатам строится экспериментальная гистограмма распределения. Далее указанная гистограмма обрабатывается вероятностными методами, в результате чего устанавливается диапазон неопределенности ЗС (диапазон неопределенности расчета соответствующего модельного параметра) по критерию попадания в него не менее 95% экспериментальных точек, а также закон распределения в указанном диапазоне. Подобный частный случай детально изложен в [16] и в настоящей статье рассматривается в минимальном объеме только как необходимое условие для решения более общей задачи.

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 $Y = f(X_1, X_2)$ [17]. Если исходить из принципа аддитивного влияния неопределенности (погрешности) X_1 и X_2 на неопределенность расчета парамет-

ра 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.

Для нормального распределения можно, соответственно, 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 происходящих 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 значимо 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 погрешности и ее перенос на определяемые характеристики искомого ЗС.

Далее представлены примеры, демонстрирующие описанный метод.

СЛУЧАЙ ОДНОГО ЗНАЧИМОГО ЗС

При обосновании неопределенностей ЗС расчетного кода KORCAP были, в частности, использованы результаты опытов по измерению коэффициента трения в гидродинамически гладких трубах в зависимости от числа Рейнольдса, проведенных в Принстонском университете (Princeton University) [18] и Университете Орегона (University of Oregon) [19]. Массив экспериментальных данных содержал 54 точки в диапазоне чисел $Re = 2227 - 35540000$.

Указанные экспериментальные данные были использованы для обоснования статистических характеристик неопределенности ЗС, ответственного в РК KORCAP за расчет коэффициента трения жидкой фазы о стенку (AOUAS\$ № 6 [16]). В результате были определены следующие характеристики: закон распределения – нормальный, математическое ожидание $MO = 1.013$, среднеквадратичное отклонение $\sigma = 0.03$. Полученное

значение МО говорит о том, что в РК KORCOP расчетное значение коэффициента трения жидкой фазы о стенку является в среднем на 1.3% заниженным по сравнению с экспериментальными данными.

В РК KORCOP для описания дисперсно-кольцевого режима используется модель раздельного трения фаз [7], предполагающая, что в контакте со стенкой находится лишь жидккая фаза. При этом для расчета коэффициента трения жидкой фазы о стенку (ЗС № 8 [16]) в указанном режиме применяются 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. В указанных экспериментах, в частности, исследовали зависимость истинного объемного паросодержания ϕ от относительной энталпии потока h в вертикальной круглой трубе внутренним диаметром 17 мм. Измерения осуществляли двумя способами: с помощью γ -просвечивания и методом изокинетического пробоотбора. Для анализа отобрали 70 экспериментальных точек, полученных при давлениях $p = 6.86$ и 9.8 МПа, массовых скоростях $\rho w = 500, 750, 1000 \text{ кг}/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$ и относительной энталпии потока $h = 0.1 - 0.5$.

Результаты расчета типичного эксперимента по РК KORCOP представлены на рис. 1 и демонстрируют приемлемое качество воспроизведения кодом данных опыта.

Выявление доминантных ЗС, оказывающих решающее влияние на результаты расчета, выполняли с помощью анализа чувствительности. Для этого совместно с РК KORCOP была использована программа анализа неопределенности данных PANDA (разработка НИТИ им. А.П. Александрова).

Результаты анализа чувствительности, представленные в виде гистограммы значений коэффициентов ранговой корреляции Спирмена (KPKC) при числе варьируемых параметров $n = 34$ на рис. 2,

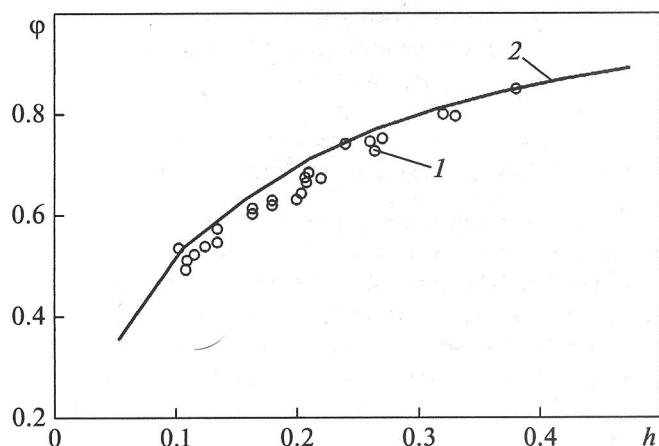


Рис. 1. Сравнение результатов расчетов по РК KORCOP с экспериментальными данными для $p = 9.8$ МПа, $\rho w = 1000 \text{ кг}/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$.
1 — экспериментальные данные; 2 — расчет

КРКС

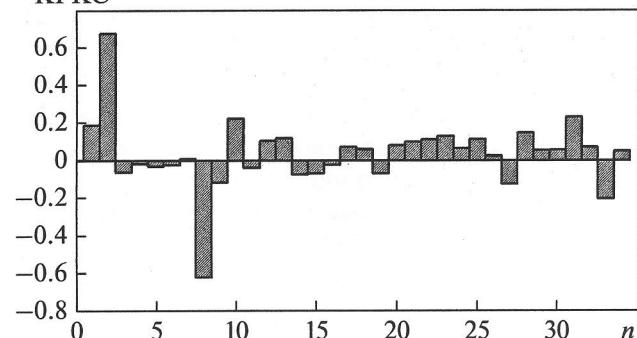


Рис. 2. Результаты анализа чувствительности расчета ϕ при $p = 9.8$ МПа, $\rho w = 1000 \text{ кг}/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$, $h = 0.25$

позволили установить, что количественно результаты расчета данного режима в решающей степени определяются следующими параметрами [16]:

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

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

Оба параметра примерно в равной степени влияют на расчет истинного объемного паросодержания ($|KPKC| \approx 0.6$), 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. 2, ниже порога значимости, соответствующего значению $|0.3|$. Данный результат является физически непротиворечивым. Так, например, влияние межфазного

тепломассообмена незначительно, поскольку температура пароводяного потока в рассматриваемых экспериментах соответствует температуре насыщения. Влияние теплового потока на зависимость $\phi(h)$, как отмечают авторы выполненных экспериментов, обнаружено не было.

Если принять предположение о независимости ЗС № 2 и ЗС № 8 как случайных величин (во всяком случае, в РК KORCAP прямая функциональная связь между данными соотношениями отсутствует), то результаты расчета $\phi(h)$ 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 применяли методически тот же способ, что и в случае с одним значимым ЗС, со следующей особенностью: в вариантах расчетах, выполняемых для построения гистограммы плотности вероятности P , осуществляли одновременное изменение диапазона неопределенности ЗС № 8 и ЗС № 2 [соответствующих AOUAS\$(8) и AOUAS\$(2)] с равным шагом 10% базового значения θ , равного 1. На каждом шаге определяли количество точек, охватываемых расчетом. Сформированная таким образом гистограмма с результатами ее обработки представлена на рис. 3.

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

Анализируя полученные результаты по оценке неопределенности коэффициента межфазного тре-

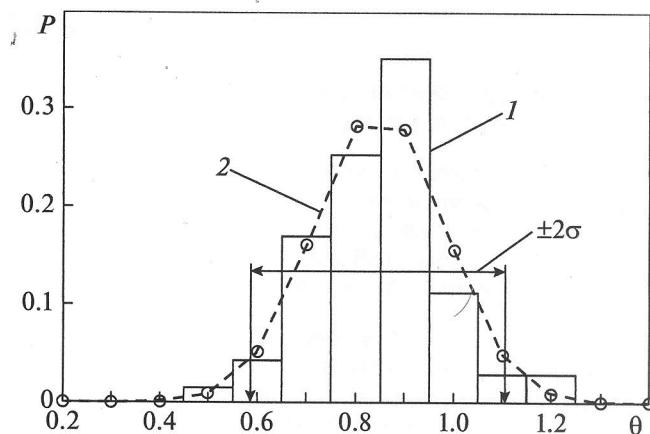


Рис. 3. Результаты обоснования статистических характеристик композиции.

1 — гистограмма плотности распределения (эксперимент); 2 — теоретическая плотность распределения композиции

ния в дисперсно-кольцевом режиме течения, необходимо отметить следующее.

Применение метода позволило решить задачу по оценке неопределенности ЗС кода, используемого для расчета параметра, прямое измерение которого в эксперименте не представляется возможным.

Достаточно большое значение σ обусловлено заметным разбросом экспериментальных данных. В случае привлечения для решения рассматриваемой задачи дополнительной экспериментальной информации, обладающей большей точностью, данная характеристика может быть уточнена.

РЕЗУЛЬТАТЫ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДА

Описанный метод был применен для обоснования статистических характеристик ряда модельных параметров РК KORCAP. Результаты обоснования представлены в таблице с указанием диапазонов режимных параметров, в которых они применимы,

Статистические характеристики некоторых модельных неопределенностей РК KORCAP

Наименование и номер модельного параметра РК KORCAP (в соответствии с [16])	МО	σ	Параметр
Коэффициент межфазного трения в дисперсно-кольцевом режиме течения [AOUAS\$(2)]	0.835	0.128	$p = 6.86\text{--}9.8 \text{ МПа};$ $\rho_w = 500\text{--}1000 \text{ кг}/(\text{с} \cdot \text{м}^2);$ $h = 0.1\text{--}0.5$
Коэффициент трения жидкой фазы о стенку [AOUAS\$(6), AOUAS\$(8)]	1.013	0.03	$Re = 2200\text{--}35\,000\,000$ [18, 19]
Доля теплового потока от стенки, идущая на генерацию пара в режиме кипения недогретой жидкости [AOUAS\$(23)]	1.3	0.172	$p = 3.01\text{--}14.75 \text{ МПа};$ $\rho_w = 960\text{--}2100 \text{ кг}/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$ [20]
Коэффициент теплообмена паровой фазы со стенкой в дисперсном режиме [AOUAS\$(29)]	0.754	0.12	$p = 6.86\text{--}13.7 \text{ МПа};$ $\rho_w = 500\text{--}1000 \text{ кг}/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$ [21]

и со ссылками на использованные эксперименты. Для всех параметров, представленных в таблице, с помощью критерия согласия Пирсона был обоснован нормальный закон распределения. Полученные результаты рекомендуются к использованию при выполнении анализа неопределенностей с помощью РК KOPCAP методом GRS.

ВЫВОДЫ

1. Реализована возможность в рамках предложенного метода оценивать неопределенность параметров ЗС теплогидравлических расчетных кодов при их совместном влиянии на результаты расчета.

2. С применением предложенного метода обоснована неопределенность ряда модельных параметров РК KOPCAP. Полученные результаты рекомендуются к использованию в расчетах с применением РК KOPCAP в рамках метода GRS.

3. Применение предлагаемого метода позволяет повысить объективность получаемых результатов при выполнении анализа неопределенностей теплогидравлических расчетов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Общие положения обеспечения безопасности атомных электростанций НП-001-15. М.: НТЦ ЯРБ, 2016.
- RELAP5-3D. Code Manual. Volume I: Code Structure, System Models and Solution Methods. INEEL-EXT-98-00834.** Idaho National Laboratory, 2005.
- Lerchl G., Austregesilo H.** ATHLET Mod 1.2 Cycle D. User's Manual. 2001. GRS-P-1. V. 1.
- Bestion D., Geffraye G.** The CATHARE Code. CEA Grenoble Report. SMTH/LDMS/EM/2002. LA-UR-00-910.
- Опыт создания и основные характеристики теплогидравлического расчетного кода нового поколения KOPCAP / В.А. Василенко, Ю.А. Мигров, С.Н. Волкова, Ю.В. Юдов, И.Г. Данилов, В.Г. Коротаев, В.В. Кутьин, Б.Р. Бондарчик, Д.В. Бенедиктов // Теплоэнергетика. 2002. № 11. С. 11–16.
- Кузнецов Ю.Н. Теплообмен в проблеме безопасности ядерных реакторов. М.: Энергоатомиздат, 1989.
- Юдов Ю.В., Волкова С.Н., Мигров Ю.А. Замыкающие соотношения теплогидравлической модели расчетного кода KOPCAP // Теплоэнергетика. 2002. № 11. С. 22–29.
- Best estimate safety analysis for nuclear power plants: uncertainty evaluation: Safety reports series. International Atomic Energy Agency. Vienna, 2008. ISSN 1020-6450. № 52.
- Glaeser H. GRS method for uncertainty and sensitivity evaluation of code results and applications // Science and Technology of Nuclear Installations. 2008. [Электрон. ресурс.] <http://dx.doi.org/10.1155/2008/798901>
- Анализ неопределенности расчетов аварий с потерей теплоносителя для 1-го энергоблока Курской АЭС / Д.А. Афремов, Ю.В. Журавлева, Ю.В. Миронов, В.С. Назаров, В.Е. Радкевич, Д.А. Яшников // Атомная энергия. 2005. Т. 98. Вып. 6. С. 422–428.
- Пономаренко Г.Л., Быков М.А., Москалев А.М. Использование метода ВЕРУ для исследования запроектных аварийных режимов с захолаживанием в ВВЭР-1000 // ВАНТ. Серия: Обеспечение безопасности АЭС. 2009. Вып. 25. С. 78–95. [Подольск.]
- Wilks S.S. Determination of sample sizes for setting tolerance limits // The Annals of Mathematical Statistics. 1941. V. 12. P. 91–96.
- 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.
- Румянцев А.Н. Метод квантильных оценок неопределенностей // Атомная энергия. 2007. Т. 102. Вып. 4. С. 208–216.
- Яшников Д.А. Разработка и применение методики анализа неопределенности теплогидравлических расчетов аварийных режимов реакторов РБМК: дис. ... канд. техн. наук. М.: НИКИЭТ, 2013.
- Грицай А.С., Мигров Ю.А. Оценка неопределенностей моделей теплогидравлических расчетных кодов // Теплоэнергетика. 2015. № 9. С. 45–51. doi 10.1134/S0040363615090040
- Гмурман В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика: учеб. пособие для вузов. М.: Высшая школа, 2003.
- Pipe flow measurements over a wide range of Reynolds number using liquid helium and various gases / C.J. Swanson, B. Julian, G.G. Ihias, R.J. Donnelly // J. Fluid Mech. 2002. V. 461. P. 51–60.
- 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. V. 511. P. 41–44.
- Экспериментальное исследование истинного объемного паросодержания при кипении с недогревом в трубах / Г.Г. Бартоломей, В.Г. Брантов, Ю.С. Молочников, Ю.В. Харитонов, В.А. Солодкий, Г.Н. Баташова, В.Н. Михайлов // Теплоэнергетика. 1982. № 3. С. 20–22.
- Верификация модели закризисного теплообмена теплогидравлического кода KOPCAP / А.А. Веремеев, А.А. Ивашкевич, И.П. Смогалев, В.Н. Виноградов, Д.А. Ефанов, В.В. Сергеев // Теплоэнергетика. 2002. № 11. С. 66–70.

The Development of a Method for Validation of the Uncertainties of the Models Used in Thermal-Hydraulic Codes

A. S. Gritsai^a, * and Yu. A. Migrov^a

^aAleksandrov Research Institute of Technology, Sosnovyi Bor, Leningrad oblast, 188540 Russia

*e-mail: ansg_m@mail.ru

Received July 27, 2018; revised October 20, 2018; accepted October 31, 2018

Abstract—The article deals with one of the most crucial and, at the same time, problematic stages of implementing the uncertainty analysis of thermal-hydraulic calculations by the GRS method—the validation of the statistical characteristics of model uncertainties—namely, of the circuit thermal-hydraulic block's closing relations. The above relations developed, as a rule, on the semiempirical approach, are one of the main sources of uncertainty of the results calculated by the code. A task of developing the method proposed by the authors earlier that allows performing the validation procedure using verification technology and objective statistical criteria was set. The method in question allows going from an expert evaluation to the objective assessment of the model parameter uncertainties, thus enhancing the objectivity of the calculated results obtained within the framework of the GRS method. Particular problems are formulated the solution of which expands the capabilities of the method to use experimental information and to assess the uncertainties of the model parameters that cannot be directly measured experimentally. This, in turn, allows using the method for validation of the uncertainty of all most-critical model parameters of the design code. The stages of the proposed method are set forth sequentially followed by discussion of the topical problems that arise at every stage. Using practical examples, the ways of solving the formulated problems are demonstrated. The results obtained using the method for evaluation of uncertainties of a series of model parameters (closing relations) of the KORSAR thermal-hydraulic design code are provided. The results are recommended for use when analyzing uncertainties within the framework of the KORSAR code by the GRS method. Moreover, the proposed method can also be applied to other design codes.

Keywords: thermal-hydraulic design code, closing relations, GRS method, statistics, uncertainty analysis, sensitivity analysis, law of distribution, KORSAR design code