

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ БЕЗОПАСНОГО РАЗВИТИЯ
АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК
(ИБРАЭ РАН)

На правах рукописи



РЫЖОВ НИКОЛАЙ ИГОРЕВИЧ

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ОЦЕНКИ ПОГРЕШНОСТЕЙ И
НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЕЙ РЕЗУЛЬТАТОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ АВАРИЙ
НА АЭС ДЛЯ ПРОГРАММ СОКРАТ

2.4.9 – «Ядерные энергетические установки, топливный цикл,
радиационная безопасность»

АВТОРЕФЕРАТ

Диссертации на соискание учёной степени кандидата технических наук

Научный руководитель
д.ф.-м.н.
В.Н. Семенов

Москва - 2024

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте проблем безопасного развития атомной энергетики Российской академии наук (ИБРАЭ РАН).

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук
Семенов Владимир Николаевич.

Официальные оппоненты:

Морозов Андрей Владимирович,
доктор технических наук,
Акционерное общество «Государственный
научный центр Российской Федерации –
Физико-энергетический институт имени
А.И. Лейпунского», г. Обнинск,
ведущий научный сотрудник,

Карнаухов Валерий Евгеньевич,
кандидат технических наук,
Акционерное общество «Всероссийский
научно-исследовательский институт по
эксплуатации атомных электростанций»,
г. Москва, главный эксперт.

Ведущая организация:

Акционерное общество «Электрогорский
научно-исследовательский центр по
безопасности атомных электростанций», г.
Электрогорск, Московской обл.

Защита состоится 15 января 2025 г. в 14:00 на заседании диссертационного совета 24.1.496.1 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института проблем безопасного развития атомной энергетики Российской академии наук по адресу: 115191, г. Москва, ул. Б. Тульская, д. 52.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института проблем безопасного развития атомной энергетики Российской академии наук и на сайте <https://ibrae.ac.ru/contents/624/>

Отзыв на автореферат диссертации, заверенный печатью организации, просьба направлять по адресу: 115191, г. Москва, Б. Тульская ул., д. 52. Диссертационный совет ИБРАЭ РАН.

Автореферат разослан «__» _____ 2024 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
к.т.н.



В. Е. Калантаров

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

В актуальной редакции федеральных норм и правил в области использования атомной энергии [1], устанавливающих общие положения обеспечения безопасности атомных станций, введенной в 2015 году, было добавлено новое требование, в соответствии с которым детерминистические анализы безопасности должны сопровождаться оценками погрешностей и неопределенностей получаемых результатов. Причем, анализ запроектных аварий (ЗПА), которые включают в себя тяжёлые аварии (ТА), должен выполняться на основе реалистического (не консервативного) подхода, а анализ проектных аварий (ПА) на основе консервативного подхода. Способ получения оценок погрешностей и неопределенностей для различных подходов к анализу аварий в нормативных документах отсутствует. Вследствие указанных требований к анализам безопасности возникает необходимость в разработке методики получения оценок погрешностей и неопределенностей, которые будут учитывать особенности применяемых подходов к анализам безопасности АЭС. Дополнительно в федеральных нормах и правилах [1] установлено требование об обязательной аттестации используемых при обосновании безопасности программ для ЭВМ (ПрЭВМ). На момент выполнения данной исследовательской работы актуальные требования к составу отчета о верификации (обосновывающих материалов) ПрЭВМ были установлены в руководящем документе [2]. В требованиях указано, что в разработанных обосновывающих материалах должны быть указаны погрешности определения расчетных параметров, однако способ получения погрешностей не указан.

В России основной объем анализов безопасности АЭС с РУ ВВЭР в области ЗПА выполняется с использованием ПрЭВМ СОКРАТ-В1/В2 и СОКРАТ/В3. Помимо этого в ИБРАЭ РАН разработаны ПрЭВМ СОКРАТ-БН/В1 и СОКРАТ-БН/В2, которые используются для обоснования безопасности АЭС с РУ БН в области ПА и ЗПА.

В связи с выше сказанным, для удовлетворения требований федеральных норм и правил и руководящего документа возникает необходимость разработки методики оценки погрешностей и неопределенностей для линейки ПрЭВМ СОКРАТ, которая будет применяться на этапе валидации и на этапе практического применения для обоснования безопасности.

Таким образом, разработка методики оценки погрешностей и неопределённости получаемых результатов для линейки ПрЭВМ СОКРАТ является актуальной задачей.

Степень разработанности проблемы

В настоящее время довольно глубоко проработана методика оценки неопределенностей теплогидравлических расчетов в области ПА. Для интегральных

расчетов ЗПА в мире отсутствует общепринятый подход, что связано с большей сложностью и мультифизичностью процессов, протекающих при ЗПА.

Цель диссертационной работы

Основная цель диссертационной работы заключается в разработке единой методики оценки погрешностей и неопределенностей результатов расчетов на стадии валидации ПрЭВМ и на стадии её практического применения для моделирования аварий.

Достижение поставленной цели предполагает решение следующих задач:

- Разработка методики оценки погрешностей и неопределенностей на стадии валидации ПрЭВМ, которая применима как для ПрЭВМ, предназначенных для моделирования ПА с использованием консервативного подхода, так и для ПрЭВМ, предназначенных для моделирования ЗПА с использованием реалистического подхода. Методика валидации должна учитывать неопределенности экспериментальных измерений и неопределенности расчётов на количественном уровне.
- Разработка методики оценки погрешностей и неопределенностей на стадии моделирования ПА с использованием консервативного подхода. Методика должна учитывать результаты валидации и особенности консервативного подхода.
- Разработка методики оценки погрешностей и неопределенностей при детерминистическом анализе ЗПА с использованием реалистического подхода. Методика учитывает результаты валидации и особенности реалистического подхода.

Научная новизна работы

Разработанная методика впервые позволяет объединить подходы к оценке погрешностей и неопределенностей при валидации ПрЭВМ СОКРАТ и при её применении к моделированию широкого класса аварий на АЭС. Новым также является то, что методика, в отличие от известных методик, позволяет получить оценки погрешностей и неопределенностей результатов детерминистических анализов безопасности как ПА, так и ЗПА.

Практическая ценность результатов

Применительно к анализу ЗПА методика вошла в качестве Приложения №4 в РБ-166-20. Методика успешно используется в ОКБ «Гидропресс» и ИБРАЭ РАН для анализа безопасности. Методика была внедрена в практику анализа ПА на РУ БН в ОКБМ им. Африкантова и в ИБРАЭ РАН.

Разработанная методика валидации была успешно внедрена в практику валидации ПрЭВМ СОКРАТ-БН/В1 (Аттестационный паспорт №412 от 08.12.2016), СОКРАТ-БН/В2 (Аттестационный паспорт №472 от 20.11.2019), СОКРАТ-В1/В2 (Аттестационный паспорт №564 от 19.08.2022), СОКРАТ/В3 (Аттестационный паспорт №521 от 09.07.2021), которые успешно прошли экспертизу в НТЦ ЯРБ.

Методология и методы исследования

При проведении исследования использовались общепринятые методы исследования, методы математической статистики и подходы, принятые в метрологии:

- аналитический обзор существующих методов анализа неопределенностей;
- синтез существующих методов, разработанных другими авторам;
- методы трансформирования функций распределения на основе методов Монте-Карло, такие как метод простой выборки и латинского гиперкуба;
- подходы к оценке погрешностей и неопределенностей результатов измерений.

Личный вклад автора

Все результаты, выносимые на защиту, получены автором лично. Автором непосредственно разработаны:

- методика обобщения оценки модельной погрешности ПрЭВМ при валидации;
- методика оценки погрешностей и неопределенностей результатов расчетов параметров, важных для безопасности, при анализах ПА и ЗПА, учитывающая результаты валидации;
- расчетная модель эксперимента для QUENCH-06;
- анализы неопределенностей и погрешностей на демонстрационных примерах.

Модели РУ БН и РУ ВВЭР-1000, которые использованы для демонстрации, разработаны Чалым Р.В. и Томашиком Д.Ю. соответственно.

Положения, выносимые на защиту

- Методика обобщения оценки модельной погрешности ПрЭВМ при валидации, область применения которых включает в себя моделирование как ПА, так и ЗПА.
- Результаты применения методики на примере решения валидационной задачи для ПрЭВМ СОКРАТ-В1/В2.
- Методика оценки погрешностей и неопределенностей результатов расчетов параметров, важных для безопасности, при анализах ПА и ЗПА, учитывающая результаты валидации.
- Результаты применения методики на примере моделирования ПА на РУ БН по ПрЭВМ СОКРАТ-БН/В2 и ЗПА на РУ ВВЭР-1000 по ПрЭВМ СОКРАТ-В1/В2.

Достоверность и обоснованность результатов работы

Обоснованность и достоверность предложенной методики подтверждена при обсуждении на многочисленных международных и российских конференциях и семинарах, включением её в руководство по безопасности РБ-166-20 и использованием известных общепризнанных методов статистического анализа.

Апробация работы

Основные положения и результаты диссертации докладывались на российских и международных конференциях и семинарах, в том числе:

- семинары в рамках разработки РБ-166-20, 3 мая 2019 г. в АО «ОКБ Гидропресс», 22 ноября 2019 г. в НИЦ «Курчатовский институт», 4 декабря

- 2019 г. в АО «ОКБ Гидропресс», 25 декабря 2019 г. в ИБРАЭ РАН, 21 января 2020 г. в ИБРАЭ РАН, 13 февраля 2020 г. в ИБРАЭ РАН;
- семинар по обмену опытом по моделированию тяжелых аварий в рамках Германо-Российского научного и технического сотрудничества, 17 декабря 2020 г, он-лайн, GRS;
 - международная конференция по актуальным вопросам безопасности ядерных установок: Повышение безопасности эволюционных и инновационных конструкций реакторов, Вена, Австрия, 18-21 октября 2022 г.;
 - XI Научный семинар «Моделирование технологий ядерного топливного цикла» 27 февраля – 03 марта 2023 г., ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ им. академ. Е.И. Забабахина», г. Снежинск, Челябинская обл.;
 - третий в 2023 году семинар по проекту «Коды нового поколения», 25 мая 2023 г., ИБРАЭ РАН;
 - международные семинары в рамках координационного исследовательского проекта МАГАТЭ по совершенствованию современных методологий определения неопределенности и чувствительности для анализа тяжелых аварий на водоохлаждаемых реакторах, 2019 – 2024 гг.

Публикации

Соискателем опубликовано 6 научных статей в рецензируемых научных изданиях, входящих в Scopus, Web of Science и Перечень ВАК РФ. По результатам работы оформлено 5 свидетельств о регистрации ПрЭВМ. Основные результаты работы докладывались автором и обсуждались на 7 научных конференциях и семинарах.

Структура и объём работы

Диссертация состоит из введения, 3 глав, общих выводов, списка литературы из 64 библиографических ссылок. Общий объём работы составляет 104 страницы основного текста, включая 16 таблиц и 53 рисунка.

СО Д Е Р Ж А Н И Е Р А Б О Т Ы

Во введении обосновывается актуальность темы работы, формулируются основные цели и задачи исследования.

В первой главе проводится обзор существующих методик анализа неопределенностей при валидации ПрЭВМ, предназначенных для обоснования безопасности, и анализа неопределенностей результатов расчетов проектных (ПА) и запроектных аварий (ЗПА) на РУ [3, 4, 5, 6, 7]. Сформулированы основные требования к разрабатываемой методике, которые учитывают специфику разных типов аварий и процесса валидации [8].

Вторая глава посвящена описанию разработанной методики. Глава состоит из двух основных разделов.

В первом разделе второй главы приводится описание разработанной методики анализа погрешностей и неопределенностей результатов моделирования ЗПА. Выполнение расчетов с применением специализированной ПрЭВМ схоже с

выполнением косвенных измерений и выражается в форме функциональной связи $h(\mathbf{S}, \mathbf{I}) = 0$ [9] вектора выходных величин \mathbf{S} с вектором входных величин \mathbf{I} . Автор сформулирован следующий алгоритм выполнения расчетов, сопровождающихся оценками погрешностей и неопределенностей. Основные этапы выполнения детерминистических расчетов аварий на РУ включают в себя формулировку задачи и выполнение расчетов. Этап формулировки вычислительной задачи включает в себя:

- а) определение рассматриваемого сценария, аварийной последовательности, начальных и граничных условий (все входные для расчета параметры обозначены вектором \mathbf{I});
- б) определение перечня параметров, важных для безопасности \mathbf{S} ;
- с) выбор ПрЭВМ и составление модели АЭС, которые в совокупности определяют функциональную связь $h(\mathbf{S}, \mathbf{I}) = 0$;
- д) приписывание распределений вероятностей входным величинам \mathbf{I} на основе имеющейся информации.

Этап выполнения расчетов заключается в трансформировании по разработанной модели h распределений вероятностей входных величин \mathbf{I} в распределение вероятностей выходных величин \mathbf{S} . Трансформирование выполняется одним из методов Монте-Карло. Использование полученного распределения зависит от типа рассматриваемой аварии:

- а) для ПА полученное распределение используется для оценки толерантного интервала (одно- или двухстороннего), содержащего долю генеральной совокупности с заданным уровнем доверия;
- б) для ЗПА на основе полученного распределения оценивается математическое ожидание \bar{S} , принимаемого как наилучшее значение оценки параметров, важных для безопасности, и соответствующее стандартное отклонение \mathbf{u}_S ;

Количество Монте-Карло реализаций, достаточное для оценки соответствующего параметра:

- а) для толерантного интервала определяется на основе соотношения Уилкса [10], которое связывает между собой количество реализаций, число толерантных пределов, долю генеральной совокупности и уровень доверия;
- б) для математического ожидания и стандартного отклонения путем сравнения полученных оценок для выборки заданного объема и удвоенного [11].

Определение рассматриваемого сценария и выбор аварийной последовательности выполняется на основе вероятностного анализа безопасности (ВАБ) второго уровня. Таким образом, перечень входных параметров \mathbf{I} не включает в себя вероятности случайных отказов оборудования или внешних воздействий на АЭС.

Перечень параметров, важных для безопасности, \mathbf{S} зависит от типа рассматриваемой РУ и сценария аварии и выбирается для каждого случая индивидуально. Например, для ПА может рассматриваться такой параметр как максимальная температура оболочки твэл, которая затем сравнивается с

максимальным проектным пределом. Для ЗПА таким параметром может быть, например, давление среды под защитной оболочкой (ЗО), которое определяет её целостность.

В большинстве случаев входные величины I являются результатами измерений и, как следствие, сопровождаются оценками стандартных неопределенностей измерений [9]. Например, для параметров, измеряемых на АЭС с РУ ВВЭР, существует руководящий документ, в котором указаны неопределенности измерений основных параметров [16]. В случае если неопределенность какого-либо входного параметра не известна, то её величина может быть установлена экспертно, на основе литературных источников или путем сопоставления с аналогичными параметрами с известной неопределенностью. Выбор функции распределения может быть сделан на основе принципа максимума энтропии Шеннона [17]. Например, если известен только диапазон возможных значений параметра, то максимальной энтропией (минимальной информацией) будет обладать равномерное распределение. В случае известного математического ожидания и дисперсии максимальной энтропией будет обладать нормальное распределение.

Как уже говорилось выше, функциональная связь $h(S, I) = 0$ имеет две составляющих: ПрЭВМ и модель РУ. ПрЭВМ выступает в роли «инструмента» или «прибора» для косвенных измерений и представляется пользователю в виде «черного ящика». А любой измерительный прибор обладает собственной (приборной) погрешностью. ПрЭВМ, применяемые для детерминистических расчетов, содержат реалистичные и упрощенные модели физических процессов и явлений, а, следовательно, обладают собственной погрешностью. Будем называть эту погрешность «модельной погрешностью» и обозначим её δ_{model} . Она может включать в себя систематическую составляющую погрешности - обозначим \bar{E} и случайную составляющую, которую обозначим u_{val} . Значения систематической и случайной составляющих модельной погрешности оцениваются на этапе валидации ПрЭВМ, т.е. путем сопоставления с эталоном, которым выступает эксперимент. Способ оценки этих значений основан на алгоритме, предложенном в [11]. На рисунке 1 схематично изображен результат расчета S и «истинное» значение T рассчитываемой величины. Термин «истинное» значение введен и широко используется в отечественных ГОСТах [9, 12, 13] и международном метрологическом стандарте [14]. Этот термин подчеркивает, что существует некоторое значение величины, которое соответствует определению данной конкретной величины (в данном случае формулировке вычислительной задачи) и которое могло бы быть получено при идеальном измерении (расчете), но по природе своей не определимо.

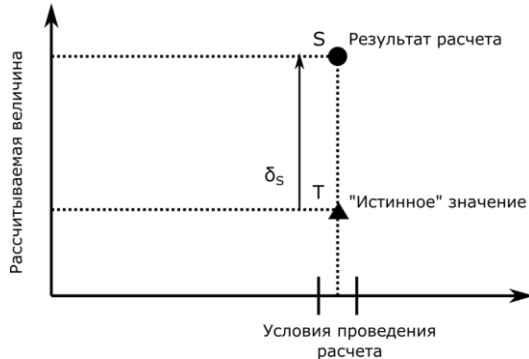


Рисунок 1 – Схематическое изображение результата расчета и «истинного» значения

По аналогии с термином «погрешность измерения», которая выражается в виде отклонения результата измерения от истинного значения [12], введем погрешность δ_S результата расчета S по отношению к «истинному» значению T

$$\delta_S = S - T. \quad (1)$$

Погрешность δ_S имеет вполне определенное значение и знак (хотя и является неизвестной величиной). В ней можно выделить три составляющих:

$$\delta_S = \delta_{model} + \delta_{input} + \delta_{num}, \quad (2)$$

где, помимо модельной составляющей погрешности расчета δ_{model} , обусловленной упрощениями и допущениями, используемыми при разработке физико-математических моделей, выделяются две составляющие, характеризующие модель РУ: δ_{input} – обусловленная неполнотой знаний о входных величинах I расчетной модели объекта и δ_{num} – обусловленная дискретизацией системы уравнений и сеточным представлением моделируемого объекта. Последняя составляющая погрешности расчета не всегда может быть отделена от модельной погрешности, так как сеточное представление может быть жестко определено в ПрЭВМ.

Из формулы (2) выразим «истинное» значение T через результат расчета S и составляющие погрешности δ_S :

$$T = S - (\delta_{model} + \delta_{input} + \delta_{num}). \quad (3)$$

Оценка составляющих модельной погрешности δ_{model} уже известна по результатам валидации ПрЭВМ. Так как «истинное» значение по природе своей не известно, то оставшиеся погрешности в правой части выражения не могут быть вычислены. В [9] и [11] предлагается погрешности оценивать посредством стандартных неопределенностей. Согласно [13] неопределенность — это неотрицательный параметр, характеризующий рассеяние значений величины, а стандартная неопределенность выражается в виде стандартного отклонения. Обозначим соответствующие стандартные неопределенности u_{input} и u_{num} .

Согласно федеральным нормам и правилам [1] ДАБ ЗПА должен выполняться на основе реалистического подхода, однако в документе не раскрыто, что

подразумевается под термином «реалистический». В комментариях [15] к [1] указано, что реалистический подход реализуется когда не делаются преднамеренно допущения, приводящие к заведомо более неблагоприятным результатам, а моделирование процессов, насколько это возможно, осуществляется так, чтобы оно отражало их реальное протекание. В стандарте МАГАТЭ [8] под реалистическим анализом понимается такой анализ, в котором используется код улучшенной оценки, реалистичные предположения о работе систем и реалистичные начальные и граничные условия. При этом дополнительно указано, что термины «реалистический подход» и «подход наилучшей оценки» являются синонимами. В отечественном ГОСТе [12] наилучшей оценкой измерения является среднее арифметическое по серии повторных независимых наблюдений. Из всего выше сказанного следует, что количественным результатом моделирования при ДАБ ЗПА является наилучшая оценка параметра, важного для безопасности.

Результатом этапа трансформирования распределений входных величин I является оценка математического ожидания результатов расчетов \bar{S} и стандартной неопределенности u_{input} , связанной с этой оценкой. Тогда наилучшая оценка прогнозируемой величины дается выражением:

$$T \approx \bar{S} - \bar{E}, \quad (4)$$

а суммарная стандартная неопределенность этой оценки может быть вычислена по формуле сложения дисперсий:

$$u_S^2 = u_{model}^2 + u_{input}^2 + u_{num}^2. \quad (5)$$

Количественный результат моделирования ЗПА для рассчитываемого параметра выражается в виде интервала для «истинного» значения этого параметра T :

$$T \in (\bar{S} - \bar{E} - u_S; \bar{S} - \bar{E} + u_S), \quad (6)$$

где наилучшей оценкой прогнозируемого параметра является $\bar{S} - \bar{E}$ (т.е. среднее значение \bar{S} , полученное на этапе трансформирования распределений входных величин и поправленное на систематическую составляющую \bar{E} модельной погрешности, а стандартная неопределенность, связанная с этой оценкой, дается значением u_S , рассчитываемой по формуле (5).

Во втором разделе второй главы приводится описание разработанной методики анализа погрешностей и неопределенностей при моделировании ПА. ДАБ ПА должен выполняться на основе консервативного подхода, что требуется согласно федеральным нормам и правилам [1]. Согласно [15] консервативный подход заключается в выборе значений параметров и характеристик РУ, которые бы обеспечивали получение более неблагоприятных результатов. Консервативными значениями задаются параметры, которые относятся к моделированию систем нормальной эксплуатации, систем безопасности и другого оборудования АЭС. Варьируемыми параметрами могут быть начальные и граничные условия. Однако часть из них, влияние которых на результат известно и однозначно, может быть задана наиболее неблагоприятными значениями. Таким образом, результатом анализа проектной аварии является консервативная оценка значения

рассчитываемого параметра. В качестве консервативного результата принято выбирать толерантный предел, полученный в результате трансформирования функций распределения входных параметров I . Так как результатом расчета аварии обычно являются временные зависимости, то соответствующий толерантный предел выбирается в каждый момент времени. Обозначим в качестве S_{max} верхний толерантный предел, а S_{min} – нижний толерантный предел.

Функция распределения модельной погрешности δ_{model} зачастую не известна и трудна для исследования. В [16], например, принятая модель погрешности измерения предполагает нормальный закон распределения. Это же следует из принципа максимума энтропии Шеннона [17]. При нормальном распределении коэффициент охвата $k = 2$ соответствует 95,5% доли генеральной совокупности [10], т.е. в интервале $(\bar{E} - k \cdot u_{model}; \bar{E} + k \cdot u_{model})$ с вероятностью 95,5% находится модельная погрешность. А толерантный интервал $(-\delta; +\delta)$, где

$$\delta = \max(|\bar{E} - k \cdot u_{model}|; |\bar{E} + k \cdot u_{model}|) , \quad (7)$$

будет ещё шире, и в нем будет находиться не менее 95% генеральной совокупности. Можно сказать, что δ является консервативной оценкой модельной погрешности δ_{model} .

Каждый из толерантных пределов должен быть поправлен на консервативную оценку модельной погрешности:

$$\begin{aligned} \tilde{S}_{max} &= S_{max} + \delta , \\ \tilde{S}_{min} &= S_{min} - \delta . \end{aligned} \quad (8)$$

На рисунке 2 графически изображено относительное расположение значений рассчитываемого параметра. Из рисунка видно, что реальный запас до разрушения барьера безопасности будет больше, чем оцененный на основе консервативного подхода запас. Дополнительный консерватизм может вноситься установлением приемочного критерия, более строгого, чем предел безопасности.

В предложенной методике консерватизм достигается тремя различными способами:

1. В расчете предположения о работе оборудования, часть начальных и граничных условий заданы консервативными значениями.

2. Анализ неопределенностей выполняется для получения соответствующего толерантного предела (огibaющей), к которому прибавляется погрешность расчета, оцененная в результате валидации.

3. Приемочный критерий может содержать в себе дополнительный запас до разрушения соответствующего барьера безопасности.

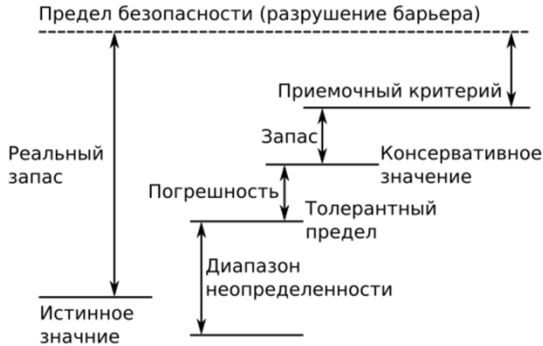


Рисунок 2 – К описанию консервативной оценки

Третий раздел второй главы посвящен описанию методики оценки погрешностей и неопределенностей при валидации ПрЭВМ и обобщению результатов валидации на серии экспериментов. Для оценки погрешности результатов расчетов по ПрЭВМ в процессе ее валидации используются как эксперименты по отдельным процессам и явлениям, так и интегральные эксперименты, выполненные в условиях, приближенных к ожидаемым условиям на АЭС в ходе аварии. Результатом валидации ПрЭВМ является оценка составляющей погрешности расчетов, связанной с упрощениями и приближениями физико-математических моделей, реализованных в ПрЭВМ. Предложенный подход к анализу погрешностей использует основные идеи стандарта ASME V&V20 [11].

Пусть D – значение параметра, измеренное в ходе эксперимента, использованного для валидации ПрЭВМ. В соответствии с метрологическим определением [18], погрешность δ_D измеренного значения D есть

$$\delta_D = D - T \quad (9)$$

Графическое представление сравнения результата расчета с измерением при валидации приведено на рисунке 3 [11].



Рисунок 3 – К валидации ПрЭВМ.

Величина E , определяемая через разность результатов расчета S и измерения D , есть погрешность результата расчета по отношению к измерению (погрешность сравнения) Ее можно выразить через погрешности δ_S и δ_D , учитывая выражения (1) и (9):

$$E = S - D = (S - T) - (D - T) = \delta_S - \delta_D. \quad (10)$$

Подставим в выражение (10) разложение погрешности расчета δ_S на составляющие из формулы (2) и выразим модельную погрешность:

$$\delta_{model} = E - (\delta_{input} + \delta_{num} - \delta_D). \quad (11)$$

Целью валидации ПрЭВМ в предлагаемом подходе является оценка погрешности δ_{model} , и для этого предложен следующий алгоритм [11]. Искомая погрешность δ_{model} определяется не только погрешностью сравнения E , но и погрешностью входных данных, численной погрешностью и погрешностью измерений.

В правой части уравнения (11) знак и модуль известны только для погрешности сравнения E . В предположении случайности и независимости всех величин в методе [11] вводится неопределенность валидации u_{val} :

$$u_{val}^2 = u_{input}^2 + u_{num}^2 + u_D^2. \quad (12)$$

где u_{input} , u_{num} , u_D – стандартные неопределенности, соответствующие погрешностям δ_{input} , δ_{num} и δ_D . Неопределенность валидации представляет собой оценку стандартного отклонения комбинации погрешностей $\delta_{input} + \delta_{num} - \delta_D$. Конечным количественным результатом валидации по методу [11] является интервал $(\bar{E} - u_{val}; \bar{E} + u_{val})$, в котором находится погрешность δ_{model} . Возвращаясь к анализу аварий, неопределенность валидации u_{val} есть не что иное, как случайная составляющая модельной погрешности. Неопределенность измерений u_D предполагается известной, поскольку ее оценка является составной частью эксперимента. Таким образом, задачей анализа неопределенностей в рамках валидации по методу ASME V&V20 [11] становится оценка неопределенностей u_{input} , u_{num} .

Для оценки неопределенности u_{input} используется метод трансформирования распределений вероятностей входных величин в распределение вероятности выходной величины так же, как это делается для модели косвенных измерений. В настоящей работе трансформирование распределений вероятностей осуществляется по методу Монте-Карло [19].

Оценка неопределенности u_{num} основана подходе, предложенном Роучем [11]. Преимуществом этого подхода является то, что он может применяться к неравномерным сеткам и может использоваться для оценки неопределенности u_{num} для любого рассчитываемого параметра (локального и интегрального) [20]. Подход Роуча основывается на сравнении результатов расчетов по ПрЭВМ с использованием двух и более сеток разной степени детальности.

В [11] нет рекомендаций к обобщению результатов валидации на серии экспериментов, направленных на измерение одной и той же величины и

выполненных в различных условиях. Автор работы предлагает следующий способ обобщения результатов валидации. Допустим, было просчитано K экспериментов либо в процессе одного не стационарного эксперимента были собраны значения K отсчетов по времени. Для нестационарного эксперимента сравнение с измерениями проводится в феноменологическом окне, в котором наблюдаются важные физические процессы. Для каждого k -ого измерения из серии от 1 до K выполнена валидация по методике, описанной выше, и получены пары значений \bar{E}_k и $u_{val,k}$. Тогда полученные результаты можно обобщить по формулам:

$$\bar{E} = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \bar{E}_k, \quad (13)$$

$$u_E^2 = \frac{1}{K-1} \sum_{k=1}^K (\bar{E}_k - \bar{E})^2, \quad (14)$$

$$\bar{u}_{val} = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K u_{val,k}, \quad (15)$$

$$u_u^2 = \frac{1}{K-1} \sum_{n=1}^N (u_{val,k} - u_{val})^2, \quad (16)$$

$$u_{val}^2 = u_E^2 + \bar{u}_{val}^2 + u_u^2, \quad (17)$$

где u_E – стандартная неопределенность, которая характеризует степень разброса систематической составляющей модельной погрешности от эксперимента к эксперименту и позволяет учесть наличие положительных и отрицательных отклонений при сравнении двух временных зависимостей, которые в среднем могут быть равны 0; \bar{u}_{val} – среднее значение стандартной неопределенности валидации; u_u – стандартная неопределенность, характеризующая степень разброса случайной составляющей модельной погрешности. Можно обратить внимание, что величина \bar{u}_{val} не может принимать отрицательные значения и будет равна 0 тогда и только тогда, когда неопределенности валидации $u_{val,k}$ всех K экспериментов равны 0, что невозможно ввиду наличия неопределенности экспериментальных измерений в формуле (12).

Третья глава посвящена описанию примеров применения разработанных методик. Глава состоит из двух основных частей.

В первой части третьей главы приведен пример валидации ПрЭВМ на базе эксперимента QUENCH-06. Продемонстрированы различные аспекты применения методики.

Эксперимент QUENCH-06 [21] посвящен исследованию окисления циркониевых оболочек твэл в условиях аварий с потерей теплоносителя и последующим заливом а.з. водой. Этот эксперимент использовался в качестве международной стандартной задачи ОЭСР [21] для валидации ПрЭВМ, предназначенных для моделирования тяжелых аварий. Рабочий участок установки представляет собой сборку из 21 имитатора твэл, заключенных в оболочки из сплава Zircaloy-4, 20 из которых были снабжены вольфрамовыми нагревателями в центральной части. Высота активной части составляла ~ 1 м, а топливо

моделировалось таблетками из ZrO_2 . Дополнительно сборка была снабжена 4 литыми стержнями из того же циркониевого сплава и дистанционировалась 4 циркониевыми решетками. Сборка заключена в циркониевый чехол, снабженный снаружи теплоизоляцией из волокон ZrO_2 , который по внешней поверхности охлаждался путем продувания аргона через рубашку охлаждения, выполненную из нержавеющей стали. Экспериментальная установка хорошо инструментирована и снабжена порядка 190 измерительными каналами, в том числе для измерения концентрации водорода в газе над сборкой.

Эксперимент выполнялся по следующему сценарию. Порядка 33 минут сборка нагревалась до температуры ~ 1473 К, а затем около 1 часа предокислялась, обдуваемая паро-аргоновой смесью. После фазы предокисления начался линейный рост мощности. Примерно через 10 минут был извлечен угловой стержень для контроля образовавшегося оксидного слоя. Ещё через 8 минут была зафиксирована резкая эскалация температуры, связанная с выделением химического тепла в результате пароциркониевой реакции. После этого был включен залив сборки водой снизу сначала из бака под давлением, а затем от насоса. Во время залива водой максимальная температура оболочек достигла величины порядка 2100 К, после чего электрическая мощность сборки была снижена в 4,5 раза. После того как все оболочки имитаторов ТВЭЛ были смочены, подача воды прекратилась, и эксперимент был окончен.

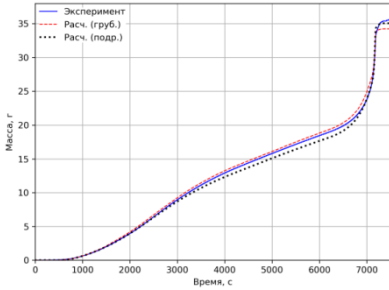
Пост-тестовые металлографические исследования сборки показали, что сборка осталась целой и сохранила стержневую геометрию. В горячем пятне (850-900 мм от низа сборки) было обнаружено растекание жидкого циркония в зазоре между таблеткой и внешним оксидным слоем. При этом на более низких высотных отметках стекание расплава в зазоре вниз обнаружено не было. На внешней поверхности оболочек обнаружены 2 капли жидкого циркония, вероятно вытекшего через трещины в оксидном слое с верхнего уровня. На внутренней поверхности чехла так же не обнаружено присутствие расплава, однако по его внешней поверхности, со стороны теплоизоляции, есть следы перемещения жидкого металлического циркония.

Для моделирования данного эксперимента была разработана нодализационная схема, которая учитывает все основные элементы установки, включая рубашку охлаждения и каналы охлаждения токоподводов водой. Основное внимание при разработке модели было уделено соблюдению теплового баланса в установке и корректному воспроизведению аксиального профиля температуры и температурного поведения установки во время эксперимента.

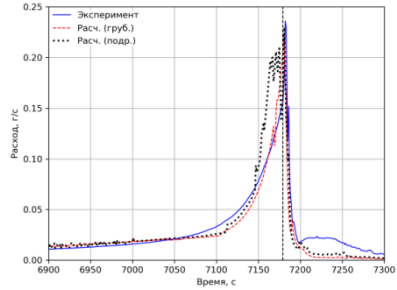
Валидируемыми параметрами были выбраны: (1) пиковая скорость генерации водорода, (2) масса водорода, выделившегося до залива, и (3) масса водорода, выделившаяся при заливе.

На начальном этапе численного анализа эксперимента согласно методике было проведено сравнение результатов расчетов на двух сетках разной степени детальности с коэффициентом измельчения $r = 2$ и вычислена численная

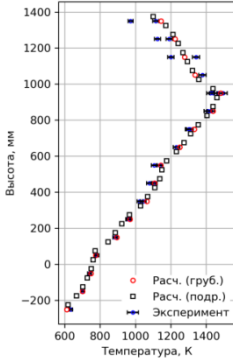
неопределенность $u_{\text{итм}}$. Сравнение рассчитанных профилей температур на фазе предокисления на рисунках 4в и 4г показывает хорошую сходимость теплогидравлической задачи с измельчением сетки. Хорошее соответствие температуры в сборке также демонстрируется близкими значениями интегральной массы водорода, рисунок 4а. На скорости генерации водорода, рисунок 4б, заметно некоторое завышение перед заливом сборки, однако оно не вносит существенный вклад в интегральную массу.



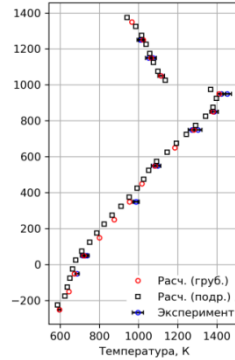
а) интегральная масса



б) расход



в) имитаторы



г) чехол

Рисунок 4 – Сравнение расчетов выхода водорода а) и б) и профилей температуры в) и г) эксперимента QUENCH-06.

На следующем этапе анализа эксперимента было выполнено трансформирование распределений 14 входных параметров методом Монте-Карло. Эти параметры характеризуют геометрические размеры сборки, начальные и граничные условия в эксперименте. Так как расчет данного эксперимента занимает незначительное количество процессорного времени (порядка 40 минут), то для более подробного анализа было выполнено 10^5 Монте-Карло расчетов. На рисунке 5 приведено сопоставление интегральной массы водорода, выделившейся на конец эксперимента в сравнении с относительной электрической мощностью, заданной в

Монте-Карло расчетах и дополнительно изображен результат измерения и референтного расчета. Все расчеты разделились на две примерно равные группы. К первой группе относятся расчеты, в которых сборка сохранила стержневую геометрию вплоть до конца эксперимента. Ко второй группе отнесены все расчеты, в которых наблюдался выход расплава на поверхность оксидного слоя хотя бы в одной расчетной ячейке. Видно, что эксперимент и референтный расчет находятся на нечеткой границе между двумя этими группами. Это подтверждает выводы пост-тестового исследования сборки о том, что эксперимент был выполнен на грани начала деградации сборки и образования расплава в межтвэльном пространстве. Для такого типа экспериментов утверждение в [11] о том, что в результатах трансформирования неопределенностей входных параметров требуется соблюдать сохранения режима проведения эксперимента, может быть не корректно и давать смещенную оценку модельной погрешности.

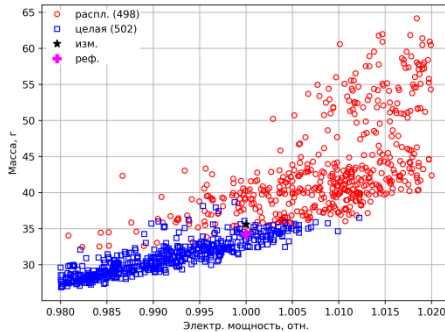


Рисунок 5 – Интегральная масса водорода в сопоставлении с относительной электрической мощностью сборки.

Отличительной особенностью анализа неопределенностей данного эксперимента является то, что среди варьируемых входных параметров присутствует параметр, общий для косвенного измерения водорода и для расчета. Этим параметром является расход аргона на входе в установку. Измерение расхода водорода в эксперименте построено на измерении расхода аргона на входе в сборку и концентраций аргона и водорода на выходе из сборки посредством масс-спектрометра. Модель косвенного измерения выражается следующей формулой:

$$\dot{m}_{H_2} = \frac{M_{H_2}}{M_{Ar}} \cdot \frac{C_{H_2}}{C_{Ar}} \cdot \dot{m}_{Ar} , \quad (18)$$

где \dot{m}_{H_2} и \dot{m}_{Ar} – расходы водорода и аргона, кг/с; C_{H_2} и C_{Ar} – объемные концентрации водорода и аргона; M_{H_2} и M_{Ar} – молярные массы водорода и аргона, кг/моль. Следовательно, результаты Монте-Карло расчетов и результаты измерения расхода и массы водорода будут коррелированы. В таблице 1 приведены количественные результаты валидации на данном эксперименте. На примере пиковой скорости генерации водорода (параметр №1) видно, что систематическая составляющая модельной погрешности относительно низкая, в то время как

случайная составляющая порядка 50%. Поэтому неучёт неопределенностей входных для расчета параметров в таком случае приводил бы к слишком оптимистичной оценке отклонения результата расчета от измерений. Модельная погрешность для массы, выделившейся перед заливом (параметр №2), характеризуется систематической и случайной составляющими одного порядка. Для данного параметра теплогидравлическая составляющая модели играет незначительную роль: течение однофазное, теплоперенос осуществляется в основном излучением. Для фазы залива большую роль играют модели двухфазного течения (образование капель, выделение уровня и т.д.) и закритического режима теплообмена. Это проявляется в существенных величинах всех составляющих модельной погрешности.

Таблица 1. Результаты анализа эксперимента QUENCH-06.

№ параметра	\bar{S}	\bar{D}	$\bar{E}, \%$	$u_{input+D}, \%$	$u_{num}, \%$	$u_{val}, \%$
1	247 мг/с	236 мг/с	4,5	52,8	6,8	53,2
2	34,5 г	31,9 г	8,2	17,6	3,9	18,0
3	2,6 г	3,8 г	-31,2	71,7	52,5	88,7

Во второй части третьей главы приведен пример моделирования ПА на РУ БН и по разработанной автором методике.

Рассматривается ПА на РУ БН, исходным событием в которой является мгновенная полная блокировка проходного сечения одной ТВС при работе РУ на номинальном уровне мощности. В качестве параметра, который является критерием для оценки безопасности энергоблока, в данной работе принято не превышение проектного предела по количеству и характеру повреждения твэлов. Таким пределом является не превышение максимальной температуры оболочке твэлов второго ряда ТВС, смежного с аварийной ТВС.

Для анализа была разработана модель РУ, которая включает в себя корпус РУ, промежуточный контур и часть второго контура со стороны ПГ. Второй контур ограничен входом и выходом ПГ.

На начальном этапе анализа ПА был выполнен референтный расчет и рассмотрена феноменология протекания аварии. После образования блокады и останова расхода в аварийной ТВС начинается разогрев оболочек твэлов, и через ~ 4 с происходит плавление топлива. Образовавшийся расплав растекается в аксиальном и радиальном направлениях и к 8 секунде проплавляет чехол аварийной ТВС. К 19 секунде начинается проплавление чехлов смежных 6-ти ТВС. В расчете срабатывание АЗ произошло через 21 с после исходного события. Через 35-40 с после исходного события температура оболочек твэл ТВС второго ряда, рисунок 6, снижается и дальнейшего роста температуры и распространения расплава вбок не происходит.

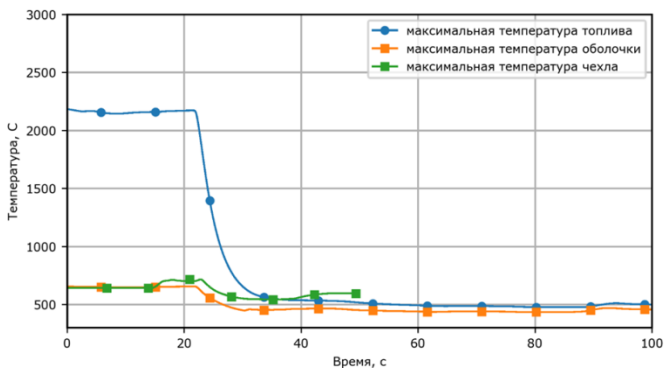
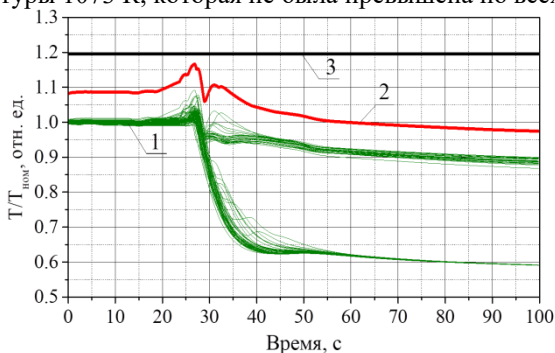


Рисунок 6 – Максимальная температура в ТВС 2-го ряда.

Согласно методике, был разработан перечень из 17 неопределенных входных параметров. Перечень включает в себя геометрические размеры, начальные и граничные условия и параметры моделей не зафиксированные на этапе валидации ПрЭВМ. Трансформирование распределений было выполнено методом простой выборки, а количество расчетов определено из соотношения Уилкса. Для одного толерантного предела уровня доверия 0,95 и доли генеральной совокупности 0,95 требуется выполнить не менее 59 расчетов. На рисунке 7 изображен получившийся верхний толерантный предел для температуры чехла ТВС 2-го ряда, поправленный с учетом результатов валидации ПрЭВМ. Приемочным критерием является величина температуры 1073 К, которая не была превышена по всех расчетах.



1 – приемочный критерий; 2 – консервативное значение; 3 – Монте Карло расчеты
Рисунок 7 – Температура оболочек твэл ТВС 2-го ряда.

Во третьей части третьей главы приведен пример моделирования ЗПА на РУ ВВЭР по разработанной автором методике.

Рассматривается ЗПА типа «Большая течь» на РУ ВВЭР-1000/В-320 [22] исходным событием в которой является гильотинный разрыв патрубка КД с одновременным наложением обесточивания, которое приводит к отказу всех

активных систем безопасности. Анализ ограничен рассмотрением только внутри корпусной стадии аварии. В качестве рассчитываемого параметра рассматривается интегральный выход водорода в течь.

Для анализа была разработана модель РУ, которая включает в себя корпус РУ, 4 циркуляционных петли, КД и парогенераторы. Модель второго контура ограничена турбогенератором (моделируется в качестве граничного условия).

На начальном этапе анализа ЗПА был выполнен референтный расчет и рассмотрена феноменология протекания аварии и основные физико-химические процессы её сопровождающие. Расчет показал, что уже через 5 минут от исходного события начинается осушение а.з., а через ~ 20 мин. интенсифицируется парциркулиевая реакция окисления оболочке твэл. Через ~ 30 мин. начинают образовываться локальные ванны расплава, которые постепенно продвигаются вниз. Приблизительно на 70 минуте расплав оказывается на дне корпуса РУ, выпаривает остатки воды и частично остывает. Затем происходит повторный разогрев расплава и его стратификация с выделением металлической фазы сверху. Примерно через 2,5 часа от исходного события происходит проплавление корпуса и, расчет останавливается. На рисунке 8 приведен график динамики образования и интегральный выход водорода в течь.

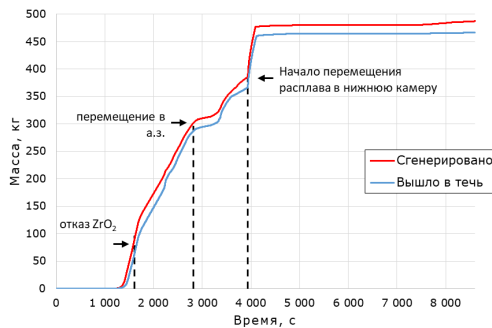


Рисунок 8 – Динамика образования и выхода водорода в течь.

Согласно разработанной методике, был составлен перечень неопределенных входных параметров. Всего было рассмотрено 23 параметра, которые включали в себя начальные и граничные условия, геометрические размеры, характеристики течи и не зафиксированные на этапе валидации параметры моделей. Особое внимание было уделено обоснованию диапазонов и функций распределения на основе литературных источников. Трансформирование распределений было выполнено методом латинского гиперкуба, и было продемонстрировано, что 200 реализаций достаточно для оценки мат. ожидания и стандартного отклонения рассчитываемого параметра. На рисунке 9 изображен график реалистической оценки выбранного параметра, которая учитывает результаты валидации ПрЭВМ и сопровождается оценкой стандартной неопределенности полученного результата. Реалистичная оценка получена по формуле (4) путем вычитания из среднего

значения \bar{S} систематической составляющей модельной погрешности \bar{E} . Полученная реалистическая оценка может использоваться для проектирования систем безопасности или в качестве исходных данных для других расчетов.

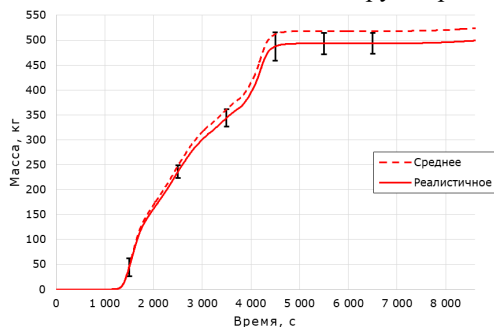


Рисунок 9 – Реалистическая оценка параметра

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Цель исследования - разработка единой методики оценки погрешностей и неопределенностей на стадии валидации ПрЭВМ и на стадии её практического применения для моделирования аварий достигнута:

- разработана методика оценки погрешностей и неопределенностей на стадии валидации ПрЭВМ, которая применима как для ПрЭВМ, предназначенных для моделирования ПА с использованием консервативного подхода, так и для ПрЭВМ, предназначенных для моделирования ЗПА с использованием реалистического подхода. Методика валидации учитывает неопределенности экспериментальных измерений и неопределенности.
- разработана методика оценки погрешностей и неопределенностей на стадии моделирования ПА, которая учитывает результаты валидации и особенности консервативного подхода.
- разработана методика оценки погрешностей и неопределенностей при моделировании ЗПА, которая учитывает результаты валидации и особенности реалистического подхода.

РАБОТЫ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Evaluation of uncertainties associated with best estimates of parameters in the deterministic analysis of a severe accident / **N.I. Ryzhov** [et al.] // Nuclear Engineering and Design. – 2023. – Vol. 415. – P. 112741.
2. Модель нуклидной кинетики для расчета тяжелых аварий / **Н. И. Рыжов** и др. // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Ядерно-реакторные константы. – 2022. – № 4. – С. 5-14.

3. Estimation of system code SOCRAT/V3 accuracy to simulate the heat transfer in a pool of volumetrically heated liquid on the basis of BAFOND experiments / **N. I. Ryzhov** [et al.] // Annals of Nuclear Energy. – 2021. – Vol. 151. – P. 107902.
4. Numerical assessment of PARAMETER-SF1 test on oxidation and melting of LWR fuel assembly under top flooding conditions / **N. I. Ryzhov** [et al.] // Nuclear Engineering and Design. – 2020. – Vol. 369. – P. 110852.
5. Оценка возможности кода СОКРАТ моделировать процессы растворения диоксидуранового топлива жидким цирконием / **Н. И. Рыжов** [и др.] // Атомная энергия. – 2018. – Т. 125, № 2. – С. 79-85.
6. Двумерный теплогидравлический модуль интегрального кода СОКРАТ-БН: математическая модель и результаты расчетов / **Н. И. Рыжов** [и др.] // Атомная энергия. – 2016. – Т. 120, № 2. – С. 95-100.

Свидетельства о государственной регистрации ПрЭВМ

1. Программный модуль для расчетов по методу Монте-Карло, статистической обработки результатов расчетов и валидации кодов (ELENA). Версия 1.0. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2021611784 , 05.02.2021.
2. Интегральный код для анализа запроектных аварий на АЭС с РУ БН. Версия 2.1 (СОКРАТ-БН/В2.2). Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2020665653, 27.11.2020.
3. Интегральный код для анализа запроектных аварий на АЭС с РУ БН. Версия 2.1 (СОКРАТ-БН/В2.1). Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2019618126, 26.06.2019.
4. Интегральный код для анализа режимов работы РУ БН. Учебная версия 1.0 (СОКРАТ-БН/Е1.0), Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2018664599, 20.11.2018.
5. Интегральный код для анализа режимов работы РУ БН. Версия 1.0. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2017664108, 15.12.2017.

Цитированная литература

1 НП-001-15, Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии. Общие положения обеспечения безопасности атомных станций.

2 РД-03-24-2000, Требования к составу и содержанию отчета о верификации и обосновании программных средств, применяемых для обоснования безопасности объектов использования атомной энергии.

3 Best estimate safety analysis for nuclear power plants: uncertainty evaluation. - Vienna: International Atomic Energy Agency, Safety Reports Series No. 52, 2008.

4 Review of Uncertainty Methods for Computational Fluid Dynamics Application to Nuclear Reactor Thermal Hydraulics, NEA/CSNI/R(2016)4.

5 D'Auria, et. al Outline of the Uncertainty Methodology based on Accuracy Extrapolation F. Nuclear Technology. – 1995. – Vol. 109. – Issue 1. – P.21.

6 State-of-the-Art Reactor Consequence Analyses (SOARCA) Project: Uncertainty Analysis of the Unmitigated Short-Term Station Blackout of the Surry Power Station

DRAFT, available at NRC ADAMS Accession Number: ML15224A001, U.S. Nuclear Regulatory Commission, Washington, 2015.

7 Glaeser, H., GRS Method for Uncertainty and Sensitivity Evaluation of Code Results and Applications, Science and Technology of Nuclear Installations. – 2008.

8 Deterministic Safety Analysis for Nuclear Power Plants, SSG-2 (Rev. 1), Vienna: IAEA, 2019.

9 ГОСТ Р 34100.1-2017/Руководство ИСО/МЭК 98-1:2009, Неопределенность измерения. Часть 1. Введение в руководства по выражению неопределенности измерения, Москва: Стандартинформ, 2018

10 Уилкс С., Математическая статистика, М: Наука, 1967 г, 632 с.

11 «Standard for Verification and Validation in Computational Fluid Dynamics and Heat Transfer - V&V 20» // ASME, (2009).

12 ГОСТ Р 34100.3-2017/Руководство ИСО/МЭК 98-1:2009, Неопределенность измерения. Часть 3. Руководство по выражению неопределенности измерения, Москва: Стандартинформ, 2018

13 РМГ 29-2013 Государственная система обеспечения единства измерений. Метрология. Основные термины и определения. Москва: Стандартинформ, 2014

14 JCGM 200:2008, International Vocabulary of Metrology — Basic and general concepts and associated terms, 3rd Edition

15 РБ-152-18, Комментарии к федеральным нормам и правилам «Общие положения обеспечения безопасности атомных станций (НП-001-15)», Москва: ФБУ «НТЦ ЯРБ», 2018.

16 РД ЭО 1.1.2.11.0515-2014 Нормы точности измерений основных теплотехнических величин для атомных электрических станций с водо-водяными энергетическими реакторами.

17 Silviu G., Shenitzer A., The Principal of Maximum Entropy, The Mathematical Entelligencer, Vol. 7, No 1, 1985, pp. 42-48.

18 «International vocabulary of metrology – Basic and general concepts and associated terms (VIM)», 3-rd edition, JCGM 200:2012.

19 Трансформирование распределений с использованием метода Монте- Карло. Приложение 1 к «Руководству по выражению неопределенности измерения» — Оценивание данных измерений, ОКРМ 101:2008.

20 Oberkampf W.L., Roy C.J., Verification and Validation in Scientific Computing, Cambridge University Press, 2010.

21 Sepold L., et. al, Experimental and computational results of the QUENCH-06 test (OECD ISP-45), FZKA 6664, Karlsruhe, 2004

22 Iegan, S. et al., International Agreement Report, “TRACE VVER-1000/V-320 Model Validation”, NUREG/IA-0490, 2018

Рыжов Николай Игоревич

Разработка методики оценки погрешностей и неопределенностей результатов
моделирования аварий на АЭС для программ СОКРАТ

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано в печать 31 октября 2024 г.
Формат 60 × 84 1/16. Усл. печ. л. 1,25. Уч.-изд. л. 1,05.

Тираж 100 экз.
Печать на аппарате Rex-Rotary. ИБРАЭ РАН.
115191, Москва, ул. Б.Тульская, 52
Телефон: 8-495-955-22-66