

АНАЛИЗ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ И НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ РАСЧЕТА ПО КОДУ КОРСАР/ГП ДЛЯ АВАРИЙ С ОТКАЗОМ СИСТЕМЫ ОХЛАЖДЕНИЯ БАСЕЙНОВ ВЫДЕРЖКИ

© 2023 г. В. Е. Карнаухов^а, М. М. Бедретдинов^а, П. С. Гагулин^а, *
Р. М. Следков^а, О. Е. Степанов^а

^а ОКБ “Гидропресс”, ул. Орджоникидзе, д. 21, г. Подольск, Московская обл., 142103 Россия

*e-mail: gagulins@yandex.ru

Поступила в редакцию 17.06.2022 г.

После доработки 23.11.2022 г.

Принята к публикации 25.11.2022 г.

Проведен анализ чувствительности и неопределенности результатов, получаемых на основе расчетной модели работы экспериментального стенда ALADIN, выполненной на базе расчетного программного средства КОРСАР/ГП. Установка ALADIN предназначена для экспериментального наблюдения за процессами, происходящими в приреакторных бассейнах выдержки отработавшего ядерного топлива на АЭС при нарушении его охлаждения (выкипание воды и осушение хранящихся отработавших тепловыделяющих сборок), что имеет большое значение для обоснования безопасности АЭС, особенно в условиях существующего ограниченного банка данных по аналогичным процессам в условиях бассейна выдержки. Результаты, полученные с помощью расчетной модели, и данные экспериментов были опубликованы ранее и показали хорошее совпадение. Анализ чувствительности и неопределенности проведен на основе программного средства ПАНДА, в котором реализуются специальные статистические методы. По результатам проведенного анализа определены параметры, неопределенность которых оказывает наибольшее влияние на температуру имитатора тепловыделяющей сборки и уровень воды в испытательном стенде. Показано, что для рассматриваемой модели допустимо использовать упрощенный подход к проведению анализа неопределенности, основанный на рассмотрении только предельных вариантов отклонения неопределенных параметров модели. В таком случае можно заведомо покрыть всю трубку неопределенности результатов. Количество расчетных вариантов при этом существенно сокращается, а трубка неопределенности расширяется до максимально возможных границ, определяемых наложением самых неблагоприятных отклонений. Стенд ALADIN моделирует одну тепловыделяющую сборку в условиях аварии в бассейне выдержки. Если полученный результат верен для рассмотренной модели, то при схожести протекающих в бассейне процессов и теплофизических характеристик, имеется потенциальная вероятность, что упрощенный подход к анализу чувствительности и неопределенности может быть применим и при анализе безопасности бассейнов выдержки с отработавшим ядерным топливом.

Ключевые слова: анализ чувствительности и неопределенности, обоснование безопасности, анализ аварий, водо-водяной энергетический реактор, бассейн выдержки отработавшего ядерного топлива, программа для теплогидравлических расчетов КОРСАР/ГП, программный комплекс ПАНДА/КОРСАР

DOI: 10.56304/S0040363623050028

В настоящее время для анализа безопасности АЭС применяются расчетные программные средства (ПС) КОРСАР, Relap5, ATLET и др. Согласно [1–4] анализы безопасности должны сопровождаться оценками погрешностей и неопределенностей получаемых результатов. Неопределенность результатов расчета, получаемых с помощью ПС, может быть обусловлена следующими причинами:

неопределенностью исходных параметров расчетной модели, имеющих статистическую природу, например физико-химических свойств материалов, геометрических размеров, параметров работы отдельных устройств и т.п.;

неопределенностью, вызванной выбором формул, коэффициентов замыкающих соотношений, гипотез, метода численного решения и шага интегрирования системы уравнений, допущений и упрощений, принятых в процессе построения расчетной модели, а также разбиением расчетной модели на элементы (контрольные объемы, конечные элементы) и негативным влиянием эффекта неквалифицированного пользователя.

Для отдельных аварийных режимов существует вероятность того, что отсутствие учета этих неопределенностей может повлиять на оценку последствий аварийных событий. Неопределен-

ность может влиять как в сторону увеличения, так и в сторону уменьшения результатов, но заранее знать, в какую из них при наличии большого количества неопределенных параметров, далеко не всегда возможно. Это обуславливает потребность в анализе неопределенности выходных параметров расчетной модели и их чувствительности к исходным данным.

Одними из значимых аварийных процессов на АЭС являются запроектные аварии, связанные с прекращением работы системы охлаждения в приреакторных бассейнах выдержки (БВ), что может привести к выкипанию из них воды, разогреву отработавших тепловыделяющих сборок (ОТВС) и повреждению оболочек твэлов и топлива. Для обоснования безопасности в этих случаях используются модели БВ, предназначенные для выполнения теплогидравлических расчетов [5–7]. Валидация таких моделей основывается на данных экспериментальных исследований, воспроизводящих процессы, свойственные авариям в БВ. Стенд ALADIN [8] является одной из немногих экспериментальных установок, позволяющих исследовать процессы, протекающие в БВ с отработавшим топливом, при прекращении охлаждения: выкипание воды из чехлов БВ с установленными ОТВС, оголение твэлов и повышение их температуры.

В [9] приводятся информация о расчетной модели стенда ALADIN и результаты расчетов с использованием ПС КОРСАР/ГП [10]. В настоящей статье выполнена оценка чувствительности и неопределенности расчетных величин, получаемых с помощью разработанной модели.

ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ АНАЛИЗА НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ И ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ

Анализ неопределенности расчетной модели в общем случае заключается в следующем:

определение исследуемого режима установки, перечней входных неопределенных параметров и выходных параметров, для которых проводится анализ, необходимого количества наборов случайных значений неопределенных параметров для обеспечения статистической достоверности результатов;

задание для каждого входного неопределенного параметра статистических характеристик, диапазона изменения и закона распределения плотности вероятности;

генерация необходимого числа случайных наборов неопределенных параметров и проведение серии расчетов с каждым из наборов;

обоснование по результатам расчетов двустороннего толерантного интервала оцениваемого

выходного параметра с заданным уровнем надежности и достоверности.

Анализ чувствительности включает в себя:

анализ результатов расчета в целях выявления количественных и качественных взаимосвязей между исследуемыми выходными и неопределенными параметрами с применением выбранного метода оценки чувствительности;

оценку статистической значимости полученных параметров корреляции, анализ мультиколлинеарности неопределенных параметров, корректировку (при необходимости) списка параметров и повторение расчетов (при необходимости);

определение соотношения вкладов неопределенных параметров в общую неопределенность результатов расчета, выявление наиболее значимых неопределенных параметров.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И РАСЧЕТНАЯ МОДЕЛЬ

Экспериментальный стенд ALADIN (рис. 1, а) предназначен для наблюдения за выкипанием воды, осушением БВ и разогревом топлива при прекращении охлаждения в БВ. Стенд состоит из центрального чехлового канала с имитатором ОТВС квадратного сечения, аналогичного тепловыделяющей сборке (ТВС) реакторов типа BWR и выполненного в приближенных геометрических масштабах. Имитатор ОТВС представляет собой пучок электрически обогреваемых стержней, моделирующих пучок твэлов. Центральный канал окружен рядом из 44 обогреваемых стержней в нескольких чехловых каналах, имитирующих все сядные чехлы БВ с установленными ОТВС. Все каналы располагаются в прямоугольном корпусе стенда, заполненного водой, и имеют свободные проходы для воды в нижней и верхней частях. Корпус стенда открыт сверху и свободно сообщается с атмосферой. Мощность обогреваемого стержня составляла 20–100 Вт, что приблизительно эквивалентно времени выдержки ОТВС реактора типа ВВЭР-1000 от 1.5 года до 1.0 мес соответственно. Эксперименты заключались в разогреве воды в стенде и ее постепенном выкипании. В процессе исследований контролировали уровень воды в центральном канале и температуры оболочек стержней по высоте канала. Более подробное описание экспериментальной установки, методики и результатов экспериментов приведено в [8].

В [9] с использованием ПС КОРСАР/ГП разработана расчетная модель стенда ALADIN (рис. 1, б) и проведен анализ экспериментов, показавший хорошее совпадение расчетных и опытных данных (относительное отклонение $\pm 4.1\%$ по моменту времени начала оголения и $\pm 3.9\%$ по мо-

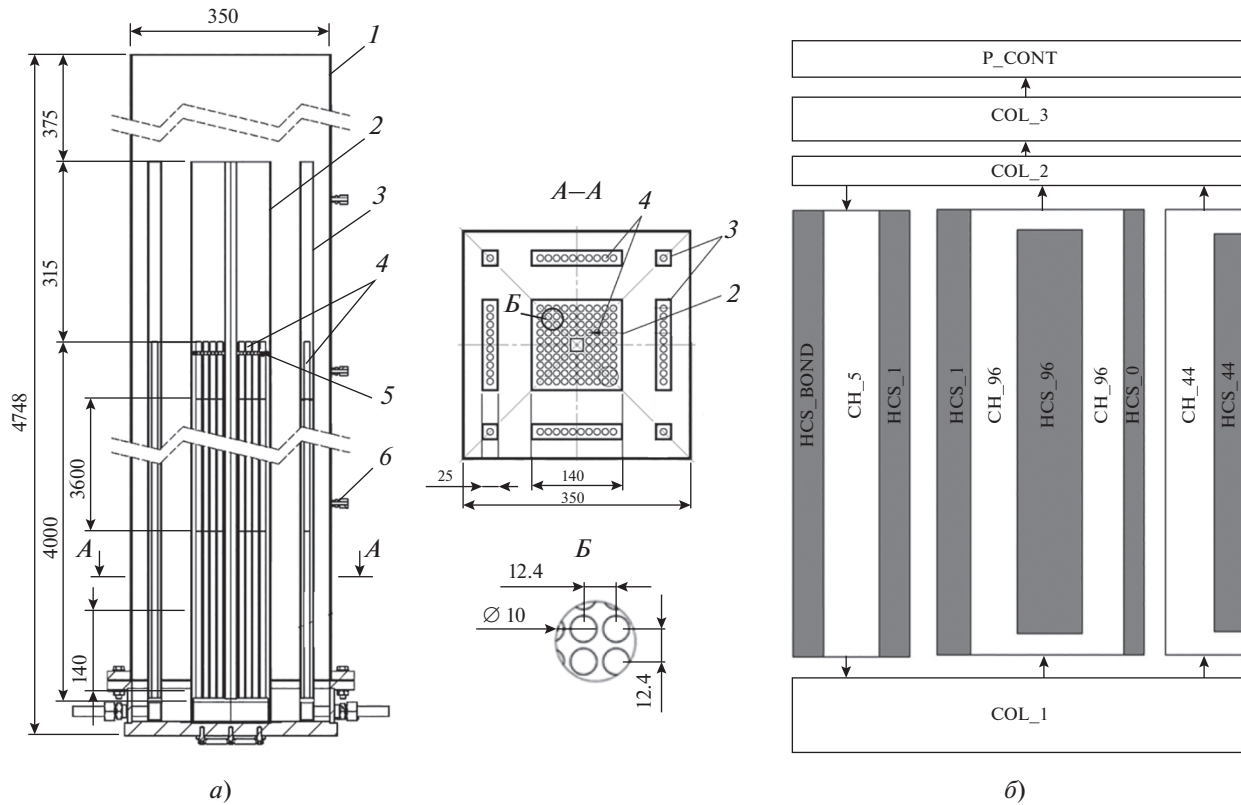


Рис. 1. Схема экспериментального стенда ALADIN (а) и его расчетная модель, выполненная на основе программы КОРСАР/ГП (б).

1 – корпус стенда; 2 – центральный чехловой канал; 3 – периферийные чехловые каналы; 4 – обогреваемые стержни имитатора ОТВС; 5 – дистанционирующие решетки; 6 – каналы вывода термопар; описание элементов расчетной модели стенда ALADIN приведено в [9]

менту времени достижения максимальной температуры оболочки обогреваемых стержней), что должно быть обосновано результатами оценки чувствительности и неопределенности расчетных величин, получаемых с помощью этой модели. В качестве расчетного режима для анализа чувствительности и неопределенности выбран вариант работы стенда при мощности стержней имитатора ОТВС 100 Вт (суммарная мощность сборки из 144 стержней равна 14.4 кВт), что приблизительно соответствует мощности остаточных тепловыделений ОТВС реактора типа ВВЭР-1000 после выдержки в течение 1 года.

ВЫБОР НЕОПРЕДЕЛЕННЫХ ПАРАМЕТРОВ РАСЧЕТНОЙ МОДЕЛИ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИХ СТАТИСТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК

Исходя из экспертного анализа теплогидравлических процессов в качестве параметров, неопределенность которых может оказать влияние на результаты расчетов, выбраны исходный уровень воды в стенде, общая мощность обогреваемых стержней имитатора ОТВС и начальная темпера-

тура воды в стенде. Диапазоны изменения $\pm 3\sigma$ неопределенных параметров приведены далее.

Нормальное вероятностное распределение

Исходный уровень воды в стенде, м.....	4.4 ± 0.048
Суммарная мощность имитатора ОТВС, Вт.....	100 ± 1
Начальная температура воды в стенде, К.....	298 ± 2.5
Коэффициент теплоотдачи снаружи корпуса стенда, Вт/(м ² · К).....	1.0 ± 0.5
Проходное сечение центрального чехла с имитатором ОТВС, м ²	0.0196 ± 0.00098

Равномерное вероятностное распределение

Теплопроводность стали, Вт/(м · К).....	20 ± 4
Теплоемкость стали, Дж/(кг · К).....	500 ± 100
Плотность стали, кг/м ³	7800 ± 1560

Использовались данные по математическим ожиданиям и дисперсиям величин [8]: погрешно-

сти измерений/задания температуры, уровня и мощности 2.5°C, 4.8 см и 1% соответственно. Нормальное распределение вероятности было принято исходя из принципа максимальной энтропии.

Как неопределенные параметры рассмотрены также эквивалентный коэффициент теплоотдачи снаружи корпуса стенда и проходное сечение центрального чехлового канала с имитатором ОТВС. При проведении экспериментов коэффициент теплоотдачи не оценивали и принимали его в модели на основе экспертной оценки. Поэтому исходя из существенной неопределенности этого параметра диапазон его варьирования был принят равным 50%. В отсутствие данных по технологическим допускам и погрешности измерения линейных размеров на стенде неопределенность в определении площади проходного сечения центрального чехла была принята равной 5%. Также был принят нормальный закон распределения вероятности.

Дополнительно в список параметров включены теплофизические свойства конструкционной стали стенда, которые задавались на основе литературных данных для отечественной нержавеющей стали [11]. Поскольку в данном случае затруднительно определить математическое ожидание и дисперсию величин, принимали их равномерное распределение с диапазоном отклонения 20%.

Диапазон границ изменения параметров был принят равным $\pm 3\sigma$, чтобы получить вероятность нахождения генерируемых случайных величин внутри заданных интервалов 99%.

Для определения необходимого минимального и достаточного количества расчетов использовали формулу Уилкса, которая связывает доверительный интервал выходных неопределенных параметров с необходимым минимальным количеством расчетов N :

$$1 - \alpha^N - N(1 - \alpha)\alpha^{N-1} \geq \beta,$$

где α – заданная доверительная вероятность, т.е. вероятность того, что значение выходного параметра лежит в интервале, образованном минимальным и максимальным значениями; β – достоверность анализа.

Формула Уилкса используется при $\alpha = 95$ и $\beta = 95$, что соответствует $N = 93$. В настоящей работе генерировалось 100 расчетных вариантов, чтобы с запасом учесть возможные нестабильности в работе программного средства. В качестве выходных параметров рассматривались две величины, имеющие ключевое значение при обеспечении безопасности эксплуатации БВ: максимальная температура оболочек обогреваемых стержней в их верхней части и уровень воды в канале с имитатором ОТВС.

В связи со сменяемостью протекающих в стенде процессов (нагрев – кипение – осушение) степень влияния неопределенных параметров на результирующие величины серьезным образом изменяется. В настоящей работе подробный анализ этих процессов не проводили. Влияние неопределенных факторов фиксировали по состоянию на момент окончания эксперимента.

ОСОБЕННОСТИ РЕАЛИЗАЦИИ ТЕХНОЛОГИИ АНАЛИЗА НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ НА ОСНОВЕ ПС ПАНДА И КОРСАР/ГП

Для проведения анализа чувствительности и неопределенности результатов расчетов сотрудники НИТИ им. А.П. Александрова разработали ПС ПАНДА [12]. На рис. 2 показана схема работы ПС ПАНДА совместно с ПС КОРСАР/ГП.

В соответствии с основными этапами расчета чувствительности и неопределенности был сформирован файл препроцессора ПС ПАНДА, содержащий описание неопределенных параметров, диапазоны их изменения и функции распределения плотности вероятности. С учетом этого файла и исходного файла модели стенда ALADIN, разработанной на основе программного средства КОРСАР/ГП, ПС ПАНДА сформировало заданное количество файлов модели, содержащих произвольные наборы неопределенных параметров. Под управлением ПС ПАНДА был произведен запуск ПС КОРСАР/ГП и обеспечено решение каждого из файлов модели, в результате чего сформированы файлы результатов.

Посредством подготовленного файла постпроцессора, где указываются выходные параметры и задается диапазон неопределенных параметров, была произведена постобработка полученных результатов.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИЗА ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ И НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ

Результатом работы ПС ПАНДА являются коэффициенты корреляции выходных параметров от набора неопределенных факторов. Из них частные (или парциальные) коэффициенты корреляции Пирсона использовали для выявления зависимости выходных параметров от каждого из неопределенных факторов, т.е. устанавливали, каково было бы влияние этого фактора на результирующую величину при условии, что влияние на нее других неопределенных факторов исключено. Частные коэффициенты в множественной корреляции вычисляются согласно известным методикам корреляционного анализа [13] и предоставляются пользователю в результате обработки данных расчетов на ПС ПАНДА.



Рис. 2. Общая схема анализа чувствительности и неопределенности

Степень влияния каждого неопределенного параметра i в их суммарном влиянии на результирующий параметр y определяли посредством дельта-коэффициентов [13] по формуле

$$\Delta_i = r_i \frac{\beta_i}{R^2},$$

где r_i – коэффициенты корреляции Пирсона;

$\beta_i = \alpha_i \frac{\sigma_{x_i}}{\sigma_y}$ – стандартизованный коэффициент

множественной линейной регрессии; α_i – коэффициент множественной линейной регрессии; σ_{x_i}, σ_y – среднеквадратические отклонения параметров x_i и y ; R^2 – коэффициент детерминации множественной линейной регрессии.

На рис. 3 представлены основные результаты анализа чувствительности результирующих параметров для рассматриваемой модели стенда ALADIN на основе ПС КОРСАР/ГП. Показаны диаграммы частных коэффициентов корреляции Пирсона и дельта-коэффициентов для каждого из неопределенных параметров расчетной модели. На рис. 3 видно, что наибольшее влияние на максимальную температуру оболочки в верхней части стержня оказывают параметры 01 (11.0%), 04 (18.5%), 06 (30.0%), 07 (35.0%), а на конечный уровень воды в сборке – параметры 01 (17.0%), 04 (22.0%), 08 (44.0%). Неопределенность остальных

параметров оказывает менее заметное влияние на результаты расчета.

Оценка статистической значимости частных коэффициентов корреляции была проведена на основе известной методики с использованием t -критерия Стьюдента [13] по выражению

$$t = |r_i| \sqrt{\frac{n-2}{1-r_i^2}},$$

где $n - 2$ – число степеней свободы.

Влияние исходного уровня воды в стенде, проходного сечения чехла с имитатором ОТВС и коэффициента теплоотдачи снаружи корпуса стенда на конечные температуру и уровень воды в чехле очевидно. Также из расчетов следует, что значительное влияние на конечную температуру верхней части обогреваемых стержней оказывают теплоемкость и плотность конструкционной стали, из которой изготовлен экспериментальный стенд. Увеличение значений этих параметров приводит к уменьшению коэффициента теплопроводности и, соответственно, снижению скорости изменения температуры стержней во времени.

На рис. 4 приведены полученные при расчетах трубки неопределенности температуры T верхней части стержней и уровня воды в стенде h в зависимости от времени τ при предельном отклонении

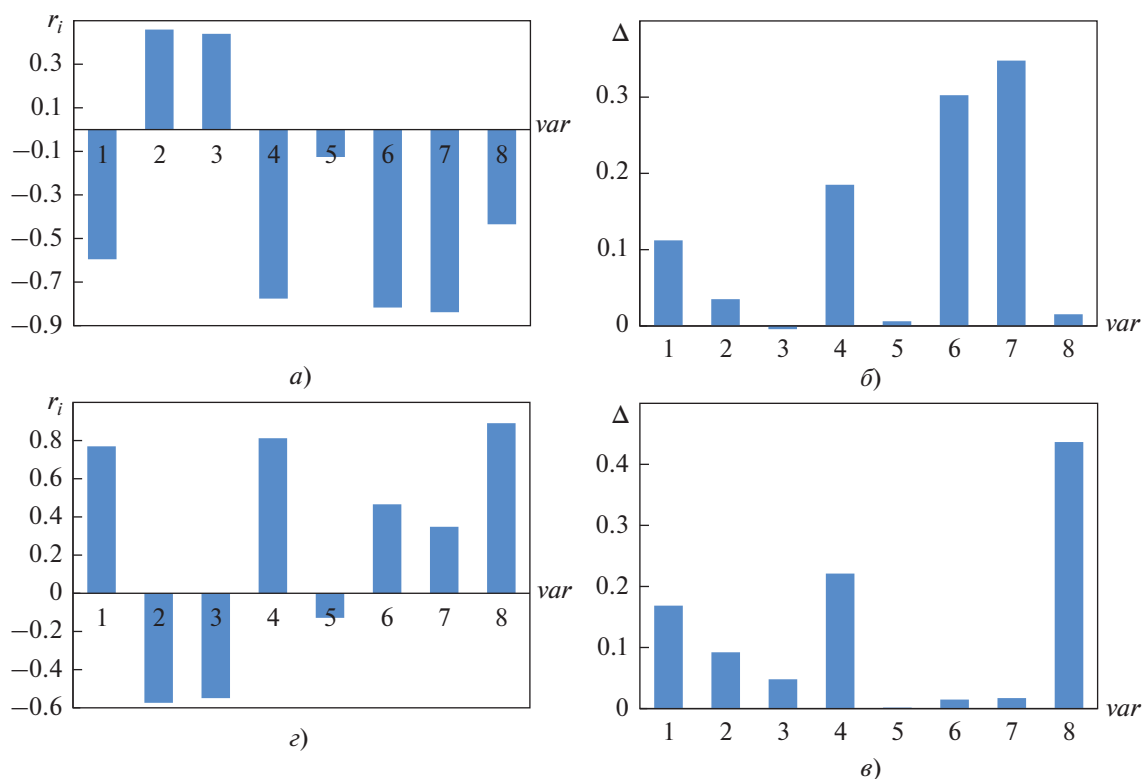


Рис. 3. Частные коэффициенты корреляции Пирсона r_i и дельта-коэффициенты Δ неопределенных параметров var для температуры оболочки верхней части обогреваемых стержней (а, б) и уровня воды в канале с имитатором ОТВС (в, г)

неопределенных параметров в максимальную и минимальную стороны (см. таблицу). Хорошо видно, что экстремальные варианты расчетов полностью охватывают трубки неопределенности выходных результатов с определенным запасом. Это указывает на то, что для рассмотренной задачи отсутствует необходимость проведения полно-

го анализа неопределенности. Вместо этого вполне достаточно рассмотреть только предельные варианты отклонений неопределенных параметров для получения экстремальных значений интересующих величин. Это позволяет избежать длительных расчетов с перебором случайных наборов неопределенных параметров.

Отклонение неопределенных параметров для получения экстремальных верхней/нижней границ температуры обогреваемых стержней и уровня воды в канале с имитатором ОТВС

Параметр	Отклонение для получения границы	
	температуры	уровня
Исходный уровень воды в стенде, м	4.352/4.448	4.448/4.352
Суммарная мощность стержней имитатора ОТВС, Вт	101/99	99/101
Начальная температура воды в стенде, К	300.5/295.5	295.5/300.5
Коэффициент теплоотдачи снаружи корпуса стенда, Вт/(м ² · К)	0.5/1.5	1.5/0.5
Теплопроводность стали, Вт/(м · К)	16/24	16/24
Теплоемкость стали, Дж/(кг · К)	400/600	600/400
Плотность стали, кг/м ³	6240/9360	9360/6240
Проходное сечение центрального чехла с имитатором ОТВС, м ²	0.02058/0.01862	0.02058/0.01862

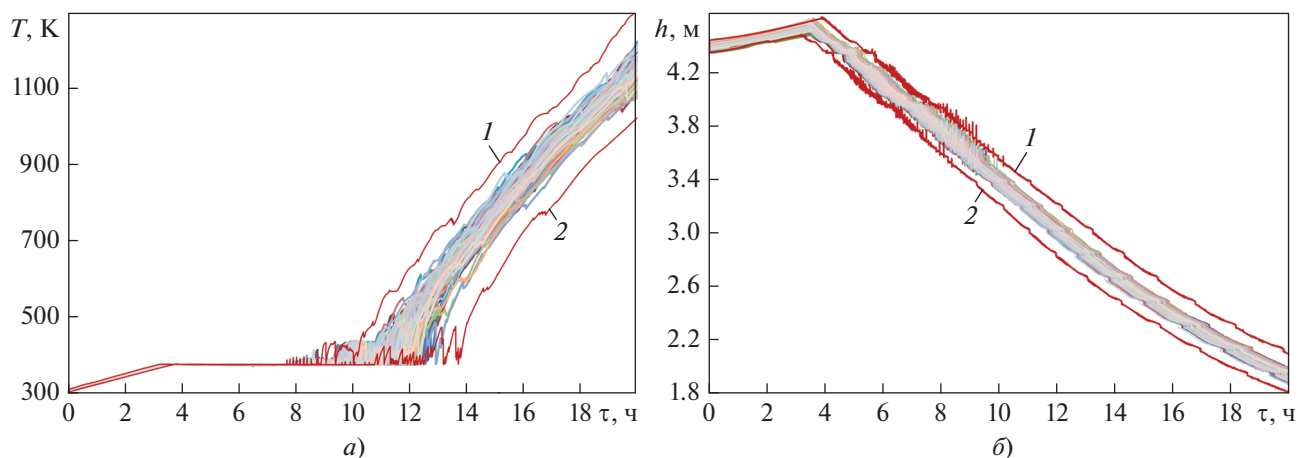


Рис. 4. Трубки неопределенности для температуры верхней части обогреваемых стержней (а) и уровня воды в испытательном стенде (б) при отклонении в максимальную 1 и минимальную 2 стороны

Стенд ALADIN имеет следующие недостатки: геометрические формы чехлов стенда и имитатора ОТВС не совпадают с шестигранной формой ТВС и чехлов БВ отечественных энергоблоков с ВВЭР;

в стенде не реализован полный диапазон мощностей, характерных для ОТВС, хранящихся в БВ;

соседние каналы в стенде лишь упрощенно моделируют соседние чехлы в БВ, так как не учитываются физические процессы, которые могут повлиять на оголение твэлов, например заброс воды из соседних каналов.

Таким образом, полученное в настоящей работе упрощение анализов чувствительности и неопределенности для аварий в БВ должно носить, очевидно, ограниченный характер. Однако следует отметить, что, несмотря на это:

стенд ALADIN адекватно воспроизводит процессы кипения и выкипания воды в чехле БВ с установленной в нем ОТВС и оголения твэлов, т.е. процессы, характерные для аварий, связанных с прекращением охлаждения БВ;

в проведенном анализе учтен основной спектр неопределенных параметров, характерных для задачи кипения воды в условиях БВ;

при моделировании нагрева и кипения воды степень влияния неопределенных параметров на результат может сильно изменяться во времени, однако трубки неопределенности, полученные “ручным” отклонением параметров, с большим запасом покрывают трубки неопределенности, полученные на основе ПС ПАНДА.

Можно предположить, что упрощенный подход может быть справедлив и для анализа чувствительности и неопределенности результатов, получаемых при расчетах аварий с прекращением охлаждения БВ на основе ПС КОРСАР/ГП, при условии подтверждения этого наблюдения после-

дующими расчетами неопределенности для этих задач.

ВЫВОДЫ

1. Экспериментальный стенд ALADIN, созданный на базе расчетного программного средства КОРСАР/ГП, адекватно воспроизводит процессы, характерные для аварий, связанных с прекращением охлаждения бассейна выдержки отработавших тепловыделяющих сборок на АЭС.

2. При схожести протекающих при реальной аварии и на стенде процессов и характеристик имеется потенциальная возможность применения упрощенного подхода для анализа чувствительности и неопределенности при обосновании безопасности бассейнов выдержки отработавшего ядерного топлива в условиях аварийных ситуаций, что, однако, должно быть подтверждено дополнительными расчетами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **НП-001-15.** Общие положения обеспечения безопасности атомных станций. М.: НТЦ ЯРБ, 2016.
2. **НП-006-16.** Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии “Требования к содержанию отчета по обоснованию безопасности блока атомной станции с реактором типа ВВЭР”. М.: Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору, 2017.
3. **Порядок** проведения экспертизы программ для электронных вычислительных машин, используемых в целях построения расчетных моделей процессов, влияющих на безопасность объектов использования атомной энергии и (или) видов деятельности в области использования атомной энергии. М.: Ростехнадзор, 2018.
4. **РБ-166-20.** Рекомендации по оценке погрешностей и неопределенностей результатов расчетных анализов безопасности атомных станций. М.: Фе-

- деральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору, 2020.
5. **Analysis** of loss of cooling and loss of coolant severe accident scenarios in VVER-1000/V446 spent fuel pool / P. Omidifard, A. Pirouzmand, K. Hadad, Sümer Şahin // *Ann. Nucl. Energy*. 2020. V. 138. No. 4. P. 107205.
<https://doi.org/10.1016/j.anucene.2019.107205>
 6. **Song Ni, Maolong Liu, Hanyang Gu.** Modeling and validation of RELAP5 for natural circulation flow in a single PWR fuel assembly // *Ann. Nucl. Energy*. 2021. No. 151. P. 107940.
<https://doi.org/10.1016/j.anucene.2020.107940>
 7. **Severe** accident code-to-code comparison for two accident scenarios in a spent fuel pool / O. Coindreau, B. Jäckel, F. Rocchi, F. Alcaro // *The 8th European Review Meeting on Severe Accident Research – ERMSAR*. Warsaw, Poland, 16–18 May 2017.
 8. **Partmann C., Schuster C., Hurtado A.** Experimental investigation of the thermal hydraulics of a spent fuel pool under loss of active heat removal conditions // *Nucl. Eng. Des.* 2018. No. 330. P. 480–487.
<https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2018.02.023>
 9. **Бедретдинов М.М., Степанов О.Е.** Валидация кодов КОРСАР/ГП и СОКРАТ/В1 для условий бассейна выдержки отработанного ядерного топлива // *ВАНТ. Сер.: Ядерно-реакторные константы*. 2021. № 3. С. 213–226.
 10. **Опыт** применения и развития расчетного кода КОРСАР для обоснования безопасности АЭС с ВВЭР/ Ю.Г. Драгунов, М.А. Быков, В.А. Василенко, Ю.А. Мигров // *Теплоэнергетика*. 2006. № 1. С. 43–47.
 11. **Чиркин В.С.** Теплофизические свойства материалов: справ. М.: Физматгиз, 1959.
 12. **Анализ** неопределенностей при численном моделировании аварийных режимов ВВЭР с помощью ПК ПАНДА/КОРСАР / А.В. Владимиров, В.С. Грановский, А.Н. Гудошников, И.Г. Данилов, Д.Н. Донченко, В.Г. Коротаев, Ю.А. Мигров // *Сб. докл. на межведомственном семинаре “Теплогидравлические аспекты безопасности активных зон, охлаждаемых водой и жидкими металлами”*. Обнинск, 2008.
 13. **Подгорнов В.В., Черный В.В.** Корреляционный анализ: учеб. пособие. Краснодар: Кубан. гос. ун-т, 2010.

Analysis of the Sensitivity and Uncertainty of Calculation Using the KORSAR/GP Code for Accidents with a Failure of Storage Pools' Cooling System

V. E. Karnaukhov^a, M. M. Bedretdinov^a, P. S. Gagulin^a, *, R. M. Sledkov^a, and O. E. Stepanov^a

^a OKB Gidropress, Podolsk, Moscow oblast, 142103 Russia

*e-mail: gagulins@yandex.ru

Abstract—An analysis into the sensitivity and uncertainty of the results obtained on the basis of the computational model of the experimental stand ALADIN, performed on the basis of the computational software tool KORSAR/GP, was carried out. The ALADIN facility is designed for experimental monitoring of the processes occurring in the near-reactor pools of spent nuclear fuel at NPPs in case of violation of its cooling (boiling of water and drying of stored spent fuel assemblies), which is of great importance for justifying the safety of NPPs, especially in the conditions of the existing limited data bank for similar processes in the spent fuel pool. The results obtained using the calculation model and the experimental data were published earlier and showed good agreement. Sensitivity and uncertainty analysis was carried out on the basis of the PANDA software tool, which implements special statistical methods. Based on the results of the analysis, the parameters whose uncertainty has the greatest impact on the temperature of the fuel assembly simulator and the water level in the test bench were determined. It is shown that it is permissible for the considered model to use a simplified approach to the analysis of uncertainty based on the consideration of only the limiting options for the deviation of the uncertain parameters of the model. In this case, one can certainly cover the entire tube of uncertainty of the results. In this case, the number of calculation options is significantly reduced, and the uncertainty tube expands to the maximum possible limits determined by the superposition of the most unfavorable deviations. The ALADIN stand simulates one fuel assembly under accident conditions in the spent fuel pool. If the obtained result is correct for the considered model then, with the similarity of the processes occurring in the pool and thermophysical characteristics, there is a potential possibility that a simplified approach to sensitivity and uncertainty analysis can also be applied in the analysis of the safety of spent fuel pools.

Keywords: sensitivity and uncertainty analysis, safety justification, accident analysis, pressurized water power reactor, spent nuclear fuel pool, KORSAR/GP program for thermal-hydraulic calculations, PANDA/KORSAR software package