

2. Штанц С., Томик Я., Гесе А. Эксплуатационная диагностика термoeлектрических цепей системы внутриреакторного контроля. — Атомная энергия, 1982, т. 52, вып. 4.
3. Тимонин А.С. Сопровождение эксплуатации термодатчиков в ВВЭР. Докл. на симп. «Измерения, важные для безопасности ВВЭР». Смоленице, сентябрь 2001 г.
4. Лыиков Б.В., Прозоров В.К. Реакторная термометрия. М., Энергоатомиздат, 1980.
5. Голянь П., Крупа С. Способ реализации и использования систем наблюдения за точностью и надежностью характеристик измерения температуры ВВЭР-440 на АЭС В1. Докл. на симп. «Измерения, важные для безопасности ВВЭР». Смоленице, сентябрь 2001 г.
6. Шимко Ю. и др. Опыт эксплуатации и предложения по усовершенствованию системы СПАС на ЭМО-6. Там же.

Поступила в Редакцию 5.12.01

УДК 621.039.576

МЕТОДИКА СТАТИСТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЕЙ ТЕПЛОГИДРАВЛИЧЕСКИХ РАСЧЕТОВ

*Афремов Д.А., Журавлева Ю.В., Миронов Ю.В., Радкевич В.Е.
(ФГУП НИКИЭТ им. Н.А. Доллежала)*

В кодах улучшенной оценки, широко применяемых при анализе безопасности ядерных реакторов, используются современные замыкающие соотношения для моделирования физических процессов, априорно не содержащие ни консервативных, ни оптимистических допущений. Тем не менее результаты каждого индивидуального расчета всегда содержат неопределенности вследствие:

технологических отклонений элементов конструкции и требований к системе контроля и управления установки (допуски на размеры, уставки системы регулирования, погрешности измерительных систем и др.);

погрешности, вносимой нодализацией объектов при их моделировании; используемых в коде замыкающих соотношений.

В связи с этим актуальной задачей является анализ неопределенности результатов расчетов. В настоящей работе исследовали неопределенности расчетов, возникающие вследствие погрешности замыкающих соотношений.

В работе [1] выделены три основных метода анализа неопределенностей:

UMAE (Uncertainty Method based on Accuracy Extrapolation) университета Пизы (Италия) [2—5]. Точность расчетов, полученная при моделировании серии теплогидравлически подобных экспериментов, экстраполируется на аварийный режим реактора-прототипа;

Управления по атомной энергии (AEA Technology, Великобритания) [6]. Эксперт выделяет исходные неопределенности в некоторых доверительных границах. Влияние этих неопределенностей затем исследуется в рамках расчетов с использованием граничных варьируемых параметров;

GRS (Германия) [7—9], IPSN (Франция) [9] и ENUSA (Испания) [9]. Это статистические (вероятностные) методы, основанные на задании исходных неопределенностей в виде случайных величин с задаваемым законом распределения.

Вероятностные методы зарекомендовали себя как наиболее обоснованные [1], но до недавнего времени их применение сдерживалось необходимостью большего числа вариантов расчетов. Ситуация изменилась с появлением мощных процессоров.

Авторами реализована методика статистического анализа неопределенности теплогидравлических расчетов на основе идей метода GRS, модернизирован код RELAP5/MOD3.2 и проведен анализ неопределенностей для рассматриваемых задач.

Предпосылки статистического определения погрешности моделирования. Математическая модель объекта основана на совокупности законов сохранения, которые записаны в виде, соответствующем выбранному способу выделения объекта из окру-

жающей среды, а также учете начальных и граничных условий, одной из форм которых являются замыкающие соотношения для законов сохранения. Выделение объекта из окружающей среды означает пренебрежение факторами, влияние которых предполагается малым. Так, в рамках теплогидравлического подхода пренебрегают влиянием электрических и магнитных полей, электропроводностью теплоносителя, вибрациями, термомеханическими свойствами стенок каналов и др.

Источниками замыкающих соотношений являются экспериментальные данные. Второстепенные факторы в экспериментах зачастую не контролируются, а их влияние проявляется как случайная погрешность в зависимостях коэффициентов теплообмена и сопротивления от определяющих параметров. Поэтому коэффициенты переноса являются случайными функциями, для которых из экспериментов можно получить распределение плотности вероятности. К числу источников погрешностей экспериментальных данных следует отнести и погрешности систем измерения. Отметим, что случайный характер погрешности приборов связан не только с погрешностями их изготовления, но и с неконтролируемым влиянием окружающей среды как при тарировке, так и непосредственно в процессе измерения. Получение распределения плотности вероятности для случайной функции предполагает многократное повторение экспериментов с одним и тем же объектом при постоянстве контролируемых параметров с последующей обработкой результатов статистическими методами.

Поскольку учесть многообразное влияние окружающей среды в рамках того или иного подхода при обработке экспериментальных данных в виде однозначных зависимостей от конечного числа параметров не удастся, получаемые корреляции описывают поведение медианы совокупности случайных экспериментальных значений. Дисперсия служит мерой качества полученных данных. Чем меньше дисперсия, тем выше качество данных.

Используемые в расчетах замыкающие соотношения получаются путем обобщения зависимостей, полученных для однотипных объектов. Использование общей для всего класса объектов погрешности параметров, определяемой экспериментально, может приводить к ее завышению для данного конкретного объекта, хотя и является вынужденным компромиссом.

Примем гипотезу, что для объекта моделирования статистические характеристики случайного влияния окружающей среды на коэффициенты замыкающих соотношений сохраняются такими же, как в экспериментах, послуживших базой для их определения. Тогда оценку точности расчетов можно получить с помощью адекватной детерминистической модели объекта (экспериментального стенда или реакторной установки), допускающей ввод погрешностей по тем или иным каналам, в том числе и для замыкающих соотношений. Варьируя случайным образом коэффициенты замыкающих соотношений в соответствии с их функциями плотности вероятности и проведя расчеты для различных произвольных сочетаний погрешностей, можно воспользоваться статистическими методами для обработки результатов расчетов и определения достоверных интервалов анализируемых величин.

Таким образом, использование статистических методов для оценки неопределенностей расчетов предполагает возможность моделирования процессов с учетом неконтролируемых погрешностей, в том числе для замыкающих соотношений.

Процедура анализа неопределенностей. В отличие от физического эксперимента, где явления, сопровождающие тот или иной процесс, реализуются естественным путем, в математической модели учет любого эффекта определяется задачами исследования и опытом составителя модели. Из этого следует, что оценки достоверных интервалов справедливы только в рамках допущений используемой модели.

Процедура статистического анализа неопределенности расчета подразумевает выполнение следующих действий:

- составление перечня неопределенностей, присутствующих в анализе;
- обоснование выбора функции распределения для каждой неопределенности;

определение числа расчетов, необходимых для достижения заданной надежности расчета доверительного интервала интересующего параметра (например, максимальной температуры оболочки твэла);

формирование генератором случайных чисел наборов неопределенностей и проведение расчетов;

статистическая обработка результатов для определения доверительного интервала и степени влияния каждой неопределенности на результаты расчета.

Большинство замыкающих соотношений кода RELAP5/MOD3.2 имеет вид

$$\beta_i = k_i f(a_i, \dots, a_j),$$

где $a_i - a_j$ — определяющие параметры; k_i — определенный из экспериментов коэффициент, вариация которого позволяет представить погрешности экспериментальных данных.

Стандартная версия кода RELAP5/MOD3.2 не позволяет через исходные данные конкретной задачи вводить коэффициенты k_i . Для реализации описанной методики в отдельные подпрограммы кода были внесены необходимые исправления. Эти исправления затрагивали описание следующих индивидуальных эффектов: трение о стенку, межфазное трение, теплообмен на твердой стенке, тепло- и массообмен на поверхности раздела фаз, массоперенос.

Так как замыкающие соотношения являются усреднением большего числа экспериментальных данных, то было принято, что их погрешности распределены по нормальному закону. Вариация k_i выполнялась в интервале от $1 - 3\sigma$ до $1 + 3\sigma$ (σ — среднеквадратичная погрешность данных). Погрешности приняты на основе информации о точности эмпирических зависимостей, изложенной в описании моделей кода RELAP5/MOD3.2 [10]. Общее число замыкающих соотношений для упомянутых индивидуальных эффектов в коде RELAP5/MOD3.2 равно 28. Названия замыкающих соотношений приняты в соответствии с документацией кода RELAP5/MOD3.2 [10].

При моделировании аварии вычисляются параметры, важные для безопасности, которые определяют приемлемость отклика системы с точки зрения принятых критериев. Наибольший интерес представляет максимальная температура оболочек твэлов и топлива. При случайном отклонении неопределенностей важные для безопасности параметры будут также изменяться случайным образом. Набор результатов, полученный в n вариантах расчетов, формирует выборку объема n из генеральной совокупности для каждого исследуемого параметра.

Цель анализа неопределенностей состоит в оценке доверительных интервалов для параметров, важных с точки зрения безопасности. В математической статистике показано (см., например, [11]), что для получения таких оценок не требуется знать функцию распределения совокупности, из которой извлечена выборка. Соотношение Уилкса, связывающее минимальное число расчетов n , необходимое для достижения заданной надежности γ , с заданной доверительной вероятностью β (β — вероятность того, что истинное значение параметра располагается внутри доверительного интервала) имеет вид [11]

$$n\beta^{(n-1)} - (n-1)\beta^n = 1 - \gamma. \quad (1)$$

Определив по результатам n расчетов минимальное $x_{\min}$ и максимальное значение $x_{\max}$ того или иного параметра x (доверительный интервал), можно с вероятностью γ утверждать, что не менее доли β всех возможных реализаций величины x располагается в интервале от $x_{\min}$ до $x_{\max}$. Необходимое число расчетов не зависит от числа неопределенностей, но быстро растет при увеличении β и γ . При $\beta = 0,95$ для γ , равного 0,5, 0,8 и 0,9, необходимо выполнить соответственно 34, 59 и 77 расчетов. При вероятностном анализе неопределенностей обычно используется $\gamma = 0,95$ и $\beta = 0,95$ [1]. В этом случае требуется провести 93 расчета.

Для количественного выражения влияния неопределенностей на изменение интересующего параметра используется коэффициент ранговой корреляции Спирмена (r) [12, 13]. Совокупность всех n вариантов расчетов представляет собой выборку объема n . Каждый расчет характеризуется как случайным отклонением k_i , так и значением рассчитываемого параметра, т.е. обладает парой признаков (A — значение параметра, важного для безопасности, B — значение k_i).

Расположим расчеты в порядке возрастания признака A (здесь и далее предполагается, что все расчеты имеют разные значения обоих признаков). Припишем расчету, стоящему на месте i , ранг x_i , равный порядковому номеру расчета. После этого расположим расчеты в порядке возрастания признака B и припишем каждому из них ранг y_i , однако для удобства сравнения рангов индекс i при y будет по-прежнему равен порядковому номеру расчета по признаку A . Ранги $x_1, x_2, \dots, x_n$ будем рассматривать как возможные значения случайной величины $X, y_1, y_2, \dots, y_n$ — как возможные значения случайной величины Y . Задача состоит в отыскании коэффициента корреляции X и Y . Напомним, что коэффициент корреляции двух независимых величин равен нулю.

В качестве оценок моментов генеральной совокупности используются выборочные моменты. Можно показать [12], что для выборочного коэффициента ранговой корреляции Спирмена справедливо выражение

$$r = 1 - \frac{6 \sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2}{n^3 - n}.$$

Если между признаками A и B имеется полная прямая зависимость в том смысле, что ранги объектов совпадают при всех значениях i , то $r = 1$. Если между признаками имеется противоположная зависимость в том смысле, что рангу $x_1 = 1$ соответствует ранг $y_1 = n$, рангу $x_2 = 2$ соответствует ранг $y_2 = n - 1$, ..., рангу $x_n = n$ соответствует ранг $y_n = 1$, то $r = -1$. Если между признаками A и B нет ни полной прямой ни противоположной зависимости, то $-1 < r < 1$, причем чем ближе к нулю его абсолютная величина, тем зависимость меньше.

Итак, значительное отклонение r от нуля позволяет сделать вывод о существовании зависимости между неопределенностью данного типа и исследуемым параметром. Для определения степени значимости надо выяснить, сколь велико может оказаться чисто случайное отклонение r от нуля, когда оба признака независимы. Для этого нужно исследовать функцию распределения r в случае двух независимых признаков. В работе [13] показано, что случайная величина r распределена асимптотически нормально с нулевым средним значением, дисперсия при n расчетах (испытаниях) $\sigma^2 = 1/(n - 1)$, и для оценки значимости корреляции можно использовать правило 3σ . Так как на практике требуется проведение около 100 расчетов, то значимыми следует признать $|r| > 0,3$.

Анализ неопределенности расчета максимальной температуры оболочек твэлов в экспериментах по вводу избыточной реактивности на модельной ТВС РБМК-1000. Изложенную методику использовали на этапах планирования и анализа экспериментов. В первом случае объектом исследования является модель топливного канала РБМК-1000, которую планируется нагревать в активной зоне импульсного графитового реактора (ИГР).

Модель представляет собой $\sim 1/7$ часть натурного топливного канала РБМК-1000, оснащенную термопарами в топливных сердечниках и на поверхности оболочек твэлов. Модель размещена в защитном чехле, кольцевой зазор между внутренней стенкой чехла и наружной стенкой канальной трубы используется для подвода теплоносителя к модели.

Требовалось выяснить возможность сохранения работоспособности модели в опытах с вводом избыточной реактивности при использовании следующего алгоритма их проведения. После прогрева оборудования и подготовки запаса воды в баллонах-накопителях установки на входе в модель создается расход воды 0,37 кг/с температурой 285 °С. На выходе поддерживается давление 7,5 МПа. Через 1 мин после начала подачи теплоносителя мощность ТВС за 10 с подымается до 300 кВт. Затем рост мощности прекращается. Для стабилизации температуры топлива делается выдержка в течение 1 мин, после чего мощность ТВС повышается со скоростью ~40 кВт/с в течение времени $\Delta t = 1$ с, затем реактор останавливается. После анализа показаний датчиков выявляется термопара(ы), показавшая(ие) наибольший рост температуры, и определяется возможность достижения кризиса теплоотдачи на достигнутом уровне мощности. Сигналы самых горячих термопар заводятся в аварийную защиту ИГР. Если резкий рост температуры оболочек не регистрируется, то период времени до останова реактора Δt увеличивается на 1 с. После достижения кризиса в ТВС соответствующий уровень мощности фиксируется как максимально допустимый.

Расчеты с помощью RELAP5/MOD3.2 проводили по описанному алгоритму с линейным повышением мощности и контролем возникновения кризиса. Если на интервале времени $\Delta t = 1$ с возникал кризис, то в конце этого интервала мощность сбрасывалась. Повышение мощности начинается на 130 с после стабилизации всех параметров и продолжается 15 с до обнаружения кризиса и останова реактора, что дает максимальную мощность 900 кВт. На 145 с возникает кризис теплоотдачи в точке верхней термопары на оболочках внешнего ряда твэлов. Сброс мощности (фактическая задержка составляет 0,2—0,4 с) приводит к исчезновению кризиса и снижению температуры.

В базовом расчете без варьирования неопределенностей (соответствующие множители равны 1) максимальная температура оболочек твэлов 597 °С. На рис. 1 для каждого момента времени приведен доверительный интервал для температуры оболочек твэлов. Линии, ограничивающие интервал, представляют собой огибающие результатов для всех 100 расчетов. Из 100 расчетов с вероятностью 95% можно утверждать, что без учета погрешности граничных условий максимальные показания термопар имеют доверительный интервал 554—618 °С ($\Delta T = 64$ °С) с доверительной вероятностью 95%.

Корреляция между максимальной температурой оболочек твэлов и исходными неопределенностями приведена на рис. 2. С учетом того, что значимыми являются $|r| > 0,3$, неопределенность максимальной температуры определяется прежде всего вариациями коэффициента теплоотдачи к однофазному теплоносителю в условиях вынужденного турбулентного течения, вычисленного по формуле Диттуса—Болтера [10] (интервал 2 оси варьируемых соотношений рис. 2), и критического теплового потока, вычисленного по методу Грюневельда [10] (интервал 16).

Рис. 2. Коэффициент ранговой корреляции Спирмена между максимальной температурой оболочек твэлов и отклонениями замыкающих соотношений: 1—8 — конвективная теплоотдача к однофазной среде; 9, 10 — теплоотдача при пузырьковом кипении; 11 — теплоотдача при пленочном кипении; 12—14 — теплоотдача при пленочной конденсации; 15—17 — критический тепловой поток; 18 — энтальпия начала кипения с недогревом; 19, 20 — теплоотдача в паровом пузырьке; 21, 22 — трение о стенку; 23—28 — межфазное трение (заштрихована область незначимых коэффициентов)

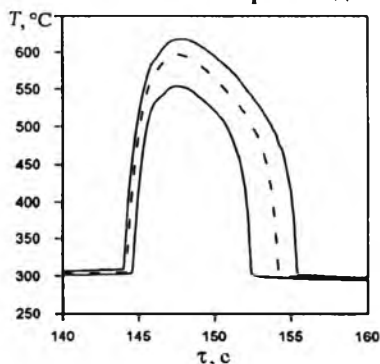
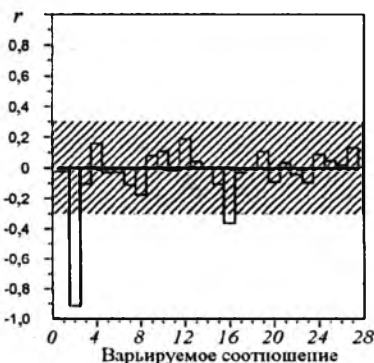


Рис. 1. Максимальная температура оболочек твэлов модельной ТВС РБМК-1000: --- базовый расчет; — доверительный интервал

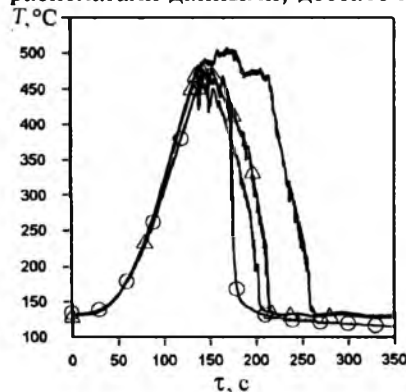


чески понятен, так как при заданной мощности максимальная температура определяется моментом наступления кризиса и коэффициентом закризисной теплоотдачи.

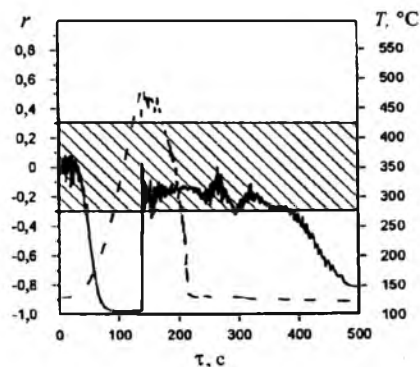
Снижение среднеквадратичного отклонения для соотношения Дитуса—Болтера [10] в 3 раза приводит к уменьшению доверительного интервала для максимальной температуры примерно на 40%, что говорит о сильной нелинейной связи между ними.

Анализ неопределенности расчета температуры оболочек твэлов модельной ТВС ВВЭР-1000 в условиях повторного залива снизу. Анализ неопределенности расчета температуры оболочек твэлов проведен для экспериментов по повторному заливу снизу 37-стержневой ТВС ВВЭР-1000. Опыты выполнены на петле повторного залива стенда СВД-1 ФЭИ [14]. Модель ТВС — сборка из 37 имитаторов твэлов косвенного нагрева с длиной обогрева 3530 мм, стальная оболочка которых отделялась от нихромового нагревателя электроизолирующей засыпкой из оксида магния. Стержни дистанционированы 15 решетками и оборудованы термопарами на поверхности оболочек. Нижнюю камеру до уровня начала зоны обогрева заполняли водой температурой 50 °С, остальную часть пучка и верхнюю камеру — насыщенным паром при давлении в выходной камере 0,246 МПа. После этого мощность модели повышали до заданного уровня, и стержни прогревались до стартовой температуры. Через 132 с от начала прогрева мощность снижали по заданному закону при подаче охлаждающей воды температурой 51 °С и расходом, обеспечивавшим подъем уровня со средней скоростью 4,91 см/с. Опыт прекращался при снижении температуры стержней до температуры кипения.

В модели эксперимента варьировали только возможные погрешности замыкающих соотношений без учета погрешностей изготовления оборудования установки, а также средств измерения и поддержания режимных параметров опытов, так как авторы не располагали данными, достаточными для их обоснованной оценки.



Р и с. 3. Температура оболочки твэла:
○ — эксперимент; Δ — базовый расчет;
— — доверительный интервал

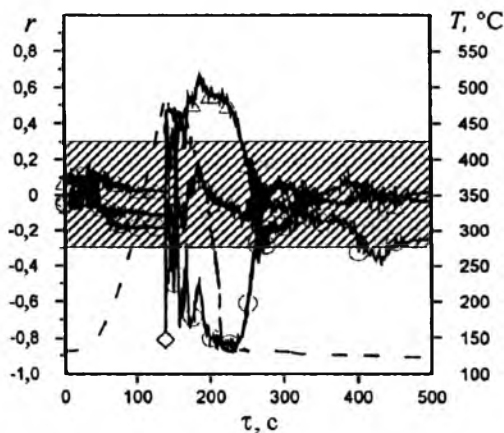


На рис. 3 приведен доверительный интервал для температуры оболочки центрального имитатора в средней части сборки (вблизи максимума энерговыделения), полученный построением верхней и нижней огибающих для 100 расчетов. Доверительный интервал охватывает максимальную температуру в эксперименте и базовом расчете (без варьирования неопределенностей), что подтверждает достаточную пригодность моделей кода RELAP5/MOD3.2 для описания повторного залива снизу.

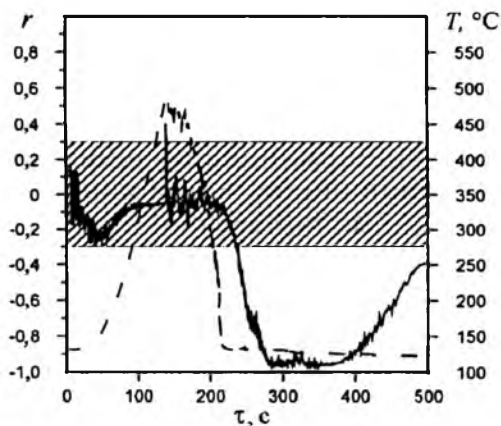
На рис. 4—6 приведены коэффициенты ранговой корреляции Спирмена, которые в тот или иной момент времени превышают по модулю значение 0,3.

При разогреве в паре на вариацию температуры оболочек (малую на этом этапе) определяющее влияние оказывает неопределенность коэффициента теплоотдачи при естественной конвекции для вертикально ориентированной поверхности, вычисленного по формуле Черчилла—Чу [10]. Разброс температуры на этапе повторного залива (150—250 с) определяется погрешностью расчета критического теплового потока и погрешностью расчета межфазного трения, выполненного для случаев дисперсных капель

Р и с. 4. Коэффициент ранговой корреляции Спирмена (—) для коэффициента теплоотдачи от вертикально ориентированной поверхности при естественной конвекции, вычисленного по зависимостям Черчилла—Чу [10] и расчетная температура оболочки имитатора (- -) (заштрихована область незначимости)



Р и с. 5. Коэффициенты ранговой корреляции Спирмена для доминирующей на этапе повторного залива неопределенности критического теплового потока ($\diamond$), коэффициента сопротивления для элемента дисперсной фазы, вычисленного по зависимостям Ишии—Чола [10] (Δ), зависимостей Шекала—Леллюша [10] для истинного объемного паросодержания в пучках стержней ($\circ$); - - - — расчетная температура оболочки имитатора (заштрихована область незначимых коэффициентов)



Р и с. 6. Коэффициент ранговой корреляции Спирмена (—) для коэффициента теплоотдачи при пузырьковом кипении и кипении с недогревом, вычисленного по соотношениям Чена [10] и расчетная температура оболочки имитатора (- - -) (заштрихована область незначимости)

ных потоков по зависимостям Ишии—Чола [10], для пузырьковых и снарядных течений в пучках твэлов — по зависимостям Шекала—Леллюша [10].

По мере снижения температуры оболочки все большую роль начинает играть коэффициент теплоотдачи при пузырьковом кипении и кипении с недогревом, вычисленный по соотношениям Чена [10] (между 280 и 390 с значение r для этих соотношений близко к единице). Вслед за этим кипение сменяется конвекцией, и определяющей вновь становится неопределенность соответствующего коэффициента теплоотдачи, вычисленного по зависимостям Черчила—Чу [10].

Анализ неопределенности моделирования разрушения модельной ТВС РБМК-1000 с помощью кода MELCOR 1.8.3. Код MELCOR 1.8.3 для анализа тяжелых аварий — инженерный, а не улучшенной оценки, так как многие процессы моделируются в нем упрощенно, в том числе критериально. В настоящее время описание процессов, характерных для тяжелых аварий, значительно уступает качеству описания термогидравлики, характерной для проектных аварий, что приводит к значительно большим погрешностям используемых зависимостей. В принципиальном плане нет препятствий для применения описанной методики к анализу неопределенностей в результатах расчетов с помощью кода MELCOR и других кодов такого класса.

Особенность протекания гипотетических тяжелых аварий — точки ветвления, после которых авария может идти по двум качественно различным сценариям. В этом случае стандартная процедура оценки (по максимальному и минимальному значению) дает неоправданно большой разброс параметров. Поэтому оценку неопределенности следует проводить для каждой ветви отдельно, а число расчетов должно быть увеличено с тем, чтобы набрать необходимую статистику. Наряду с определением доверительных интервалов для ключевых параметров находится вероятность протекания аварии по тому или иному сценарию.

Перечень параметров, варьируемых в рамках анализа неопределенностей, включал коэффициент теплоотдачи от расплава к твэлам, температуру перехода от низкотемпературного закона окисления циркония к высокотемпературному, скорость растворения топлива и диоксида циркония в расплаве, параметры, которые определяют наличие оксидной корки на поверхности твэлов, удерживающей расплав внутри себя, теплоемкость топлива, теплоту плавления циркония.

Код MELCOR 1.8.3 не модифицировали, так как перечисленные параметры доступны пользователю через входные данные.

Объектом исследования являлась модель канала РБМК-1000. Требовалось провести предтестовое моделирование ее поведения в режиме с полным прекращением расхода. После прогрева оборудования и подготовки запаса воды в баллонах-накопителях установки на входе в модель создается расход воды 6 кг/с температурой 285 °С, на выходе поддерживается давление 7,5 МПа, мощность сборки равна 325 кВт. В течение первых 300 с расчета достигается стационарное состояние, после чего полностью прекращается расход теплоносителя на входе в раздающий коллектор перед рабочим участком. В соответствии с методологией анализа было выполнено 100 расчетов с вариацией неопределенностей.

Для безопасного проведения экспериментов температура защитного чехла не должна была превышать 500 °С. Время достижения этой температуры изменялось от 432 до 459 с, поэтому изменение параметров, характеризующих процесс деградации экспериментальной ТВС, следовало рассматривать до 460 с.

На этапе разогрева и начала плавления (до 340 с) неопределенность расчета температуры элементов ТВС невелика. Вслед за этим в период 340—425 с могут иметь место кратковременные блокировки канала за счет застывания стекающего расплава. Удерживаемый расплав разогревается до температуры плавления диоксида циркония. Далее процесс ветвится: с вероятностью около 85% происходит разогрев расплава в ванне (до 460 с, до окончания эксперимента), с вероятностью около 15% — разблокировка канала и перемещение массы расплава вниз в ловушку. Масса образовавшегося водорода и масса циркония в оболочках твэлов являются важными интегральными характеристиками процесса. К моменту окончания эксперимента погрешность вычисления массы водорода составляет ~30%. Погрешность определения массы циркония в оболочках вначале возрастает, затем снижается, при этом максимальная погрешность составляет 50%. Верхняя граница для мощности энерговыделения за счет парциркуляционной реакции равна 230 кВт, что сравнимо с энерговыделением в топливе.

Заключение. Реализована процедура оценки неопределенностей, позволяющая не только определить доверительный интервал результатов анализа, но и выявить явления, дисперсия которых вносит основной вклад в общую погрешность расчета, т.е. указать области дополнительных исследований для эффективного повышения точности расчетов.

Получаемая оценка для доверительного интервала является консервативной. Можно утверждать (с вероятностью γ), что в доверительном интервале $(x_{\min}, x_{\max})$ содержится не менее доли β суммарной функции распределения параметра x . С учетом реальной функции распределения эта доля может быть значительно больше, интервал $(x_{\min}, x_{\max})$ может соответствовать гораздо более высокой доверительной вероятности. Разброс того или иного параметра может быть уточнен путем нахождения выборочных моментов распределения (среднего, дисперсии). Для получения заданной степени надежности потребуются проведение большего числа расчетов, чем в случае применения описанной методики. Такое уточнение целесообразно в том случае, если оценка, полученная на основе формулы (1), не удовлетворяет критериям приемлемости.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Девкин А.С., Мелихов О.И., Москалев А.М. и др. Зарубежные теплогидравлические коды улучшенной оценки: опыт разработки, создания и применения: Препринт НИКИЭТ, 2002.
2. D'Auria F., Debrecin N., Galassi G. Outline of the uncertainty methodology based on accuracy extrapolation. — Nucl. Technol., 1995, v. 109, № 1, p. 21—38.
3. Ambrosini W., D'Auria F., Galassi G. Boundary conditions and uncertainty evaluations in system thermalhydraulics. — In: UIT Conf., L'Aquila, Italy, June 1994.
4. D'Auria F., Faluomi V., Aksan S. A proposed methodology for the analysis of a phenomenon in separate effects and integral test facilities. — Kerntechnik, 1995, v. 60, № 4, p. 147.

5. Bonicelli M., D'Auria F., Debrecin N., Galssi G. A methodology for the qualification of thermalhydraulic codes nodalization. — In: NURETH-6 Conf., Grenoble, France, October 1993.
6. Wickett A., Neil A. Advanced LOCA Code Uncertainty Assessment: A Pilot Study. AEEW-R2508, Winfrith, UK, November 1990.
7. Glaeser H., Hofer E., Kloos M., Skorek T. Uncertainty and sensitivity analysis of a post-experiment calculation in thermal-hydraulics. — Reliability Engng System Safety, 1994, № 45, p. 19—33.
8. Hofer E. The GRS program package for uncertainty and sensitivity analysis. — In: Proc. of the Seminar on Methods and Codes for Assessing the Off-Site Consequences of Nuclear Accidents, EUR 13013, Commission of the European Communities, Brussels, 1990.
9. Uncertainty Methods Study for Advanced Best Estimate Thermal Hydraulic Code Applications. NEA/CSNI/R (97) 35, 1998, v. 1, 2.
10. RELAP5/MOD3 CODE MANUAL. NUREG/CR-5535, 1995.
11. Уилкс С. Математическая статистика. М.: Изд-во ин. лит-ры, 1967.
12. Гмурман В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика. Учебн. пос. для вузов. Изд. 7-е, стер. М.: Высшая школа, 2000.
13. Ван дер Варден Б. Математическая статистика. М.: Изд-во ин. лит-ры, 1960.
14. Ефанов А.Д., Ложкин В.В., Куликов Б.И. и др. Экспериментально-расчетное исследование процессов теплообмена в аварийных ситуациях с потерей теплоносителя. — Известия вузов. Ядерная энергетика, 2000, № 1, с. 49.

Поступила в Редакцию 22.05.02

УДК 621.039.576

РАБОТОСПОСОБНОСТЬ АСТ-500 ПРИ ЗАПРОЕКТНОЙ РЕАКТИВНОСТНОЙ АВАРИИ

Глебов В.В. (НИИ механики ННГУ)

Дефицит и дороговизна органического топлива, с одной стороны, и наметившийся рост промышленного производства, с другой, вынуждают в настоящее время пересмотреть возможности ядерной энергетики, в том числе генерации тепла. В 90-е годы был свернут перспективный именно для нашей страны проект строительства атомных станций теплоснабжения. Несмотря на достигнутый в этом проекте принципиально новый уровень безопасности по сравнению с существующими в мире атомными электростанциями, проект был свернут по соображениям, скорее, политическим, чем техническим или экономическим.

В последние годы продолжались работы по математическому моделированию и расчетным исследованиям безопасности и работоспособности АСТ при запроектной аварии, сопровождающейся разгерметизацией корпуса и отказом всех систем безопасности реактора. Аналогичная авария на электростанции с корпусным водо-водяным реактором приводит к тяжелейшим последствиям, связанным с плавлением топлива в активной зоне. В соответствии с требованиями общих положений обеспечения безопасности атомных станций [1] анализ последствий запроектных аварий является основой для составления планов мероприятий по защите персонала и населения в случае аварий, а также руководства по управлению запроектными авариями.

Несмотря на чрезвычайно малую вероятность совпадения исходного события и отказа всех систем безопасности ядерной энергетической установки, представляет интерес рассмотрение таких сценариев развития аварии, когда преградой на пути ее развития могут быть только свойства внутренней самозащищенности самого реактора.

В работе [2] впервые поставлена задача исследования гипотетических аварийных режимов, характеризующихся чрезвычайно маловероятным наложением отказов оборудования либо диверсионными действиями. Целью расчетов является повышение уровня безопасности установки посредством выработки мероприятий по прекращению опасного развития аварийных процессов и оценка резерва времени для вмешательства. В частности, рассмотрен режим непредусмотренного извлечения рабочих органов сис-