

НЕОБХОДИМЫЕ АСПЕКТЫ РЕШЕНИЯ ПРОБЛЕМЫ ПОГРЕШНОСТЕЙ И НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЕЙ

Ковалевич О.М. (НТЦ ЯРБ), Румянцев А.Н. (РНЦ «Курчатовский институт»)

Введение

В работе [1] была высказана озабоченность относительно отражения вопросов погрешностей и неопределенностей (ПИН) в материалах, обосновывающих безопасность объектов использования атомной энергии (ОИАЭ). Данная проблема неоднократно поднималась и ранее [2, 3, 4]. Можно назвать три основные причины неудовлетворительного положения. Это отсутствие четких нормативных требований к представлению в регулирующий орган информации по анализу ПИН, количественных и качественных методических указаний по анализу ПИН для различных видов ОИАЭ с присущим им состояниям и процессам и единого научного подхода к проблеме ПИН, способного объединить усилия специалистов с различными точками зрения, включая соотношение экспериментальных и расчетных данных.

Решение поставленной задачи не может быть осуществлено силами одной группы специалистов или одной организации. Требуется осознать тот факт, что проблема есть и ее надо решать на отраслевом уровне с привлечением теоретиков, расчетчиков, проектантов, эксплуатационщиков, регулирующих органов. Не исключено, что эта проблема актуальна и для других отраслей. Рассматриваемые ниже аспекты определяют векторы первоначальных усилий в решении данной проблемы для ОИАЭ.

Для анализа предлагаются следующие аспекты:

- некоторые основные термины и их толкование в рамках темы;
- используемые теоретические подходы по анализу ПИН и их интерпретация;
- учет результатов анализа ПИН при обосновании безопасности;
- предложения по системе нормативных документов, затрагивающих данную тему;
- контуры нормативного документа верхнего уровня с требованиями проведения ПИН (рамочный документ);
- возможная система нормативных и методических документов для проведения анализа ПИН в необходимом объеме;
- взаимоотношения экспериментальных и расчетных данных при определении ПИН;
- учет анализа ПИН при обосновании безопасности атомных станций (АС).

Используемые термины и их толкование

Обсуждаемая тема требует определиться с используемыми в дальнейшем терминами:

1. *Вид объекта* – ОИАЭ, предназначенный для выполнения определенной задачи (АС, исследовательские реакторы, пункты хранения радиоактивных отходов (РАО) и т.п.).
2. *Тематическое направление* – научно-технические области в исследовании безопасности определенного вида ОИАЭ.
3. *Важный для безопасности показатель (ВБП)* – показатель состояния ОИАЭ, характеризующий его безопасность.
4. *Базовое значение X_0* – значение ВБП по показателю X , представляемое для обоснования безопасности.
5. *$X_{\text{доп}}$* – допустимое значение показателя X , согласно требованиям правил и норм или принятым проектным критериям.
6. *Погрешность абсолютная* – возможное абсолютное значение отклонения ВБП от базового значения X_0 .
7. *Погрешность относительная* – отношение абсолютной погрешности к базовому значению X_0 .
8. *Неопределенность* – характеристики вероятностного отклонения значения ВБП от базового значения X_0 .
9. *Реперный эксперимент* – оцененные экспериментальные данные по определенной проблеме с минимально достижимой точностью, используемые для верификации программных средств (ПС).
10. *Интегральный эксперимент* – эксперимент, направленный непосредственно на получение значений ВБП.
11. *Дифференциальный эксперимент* – эксперимент, направленный на получение входных данных при расчетном анализе ВБП.

Прокомментируем мотивы введения обозначенных терминов. Понятие «вид объекта» и «тематическое направление» введены для того, чтобы выделять различные ОИАЭ и различные

методы анализа присущих им процессов и состояний. Понятие ВБП позволяет из множества показателей выделить для анализа ПИН разумное количество наиболее важных для безопасности показателей. Понятие «базовое значение X_0 » фиксирует анализируемое значение ВБП, полученное в результате основного анализа. Разделение понятий «погрешность» и «неопределенность» с соответствующими толкованиями – это новое предложение в рамках рассматриваемого подхода. Также новыми являются понятия «дифференциальный» и «интегральный» эксперименты, введенные для их идентификации и определения влияния на конечный результат расчета, на ПИН интересующих конечных показателей.

Используемые общие подходы к анализу погрешностей и неопределенностей

Имеется несколько подходов при анализе ПИН расчета значений функционала от нескольких переменных, связанных между собой системой уравнений. Мы коснемся только методов и подходов, используемых при решении характерных задач в области использования атомной энергии. В [3] рассматривались некоторые анализы ПИН для АС при разных подходах. В [12] приведен обзор используемых подходов при анализе ПИН для теплогидравлических процессов. Имеющиеся работы условно можно разделить на два уровня: общий теоретический и специфический тематический для определенной задачи. Хотя не во всех известных работах можно провести такое разделение, когда авторы затрагивают оба уровня.

Из известных общих подходов оценки ПИН выделим следующие.

1. Метод обобщенной теории возмущений.
2. Метод чувствительности.
3. Метод Монте-Карло.
4. Метод теории нечетких множеств.
5. Метод квантильных оценок.

Метод обобщенной теории возмущений. Данный метод на основе теории возмущений с применением сопряженных функций был разработан Л.Н.Усачевым и В.В.Орловым [4, 5] при расчетах характеристик ядерного реактора (критичность, защита от излучений, коэффициент воспроизводства и др.). Метод позволил рассчитывать коэффициенты чувствительности для различных реакторных параметров. Он основан на теории сопряженных функций для кинетического уравнения переноса нейтронов. Для возможности использования этого метода в других областях тематической направленности (другие системы уравнений) необходима разработка соответствующей теории сопряженных функций.

Метод чувствительности. Метод чувствительности позволяет достаточно простым, но трудоемким способом определять влияние неточностей входных параметров на неточность конечного результата [5].

Если функционал Y зависит от параметров X_i и авторы расчетов получили некоторое значение Y_0 , то под **погрешностью** можно понимать некоторое фиксированное (детерминированное) значение ΔY , которое авторы расчета (или разработчики ПС) предписывают погрешностям от всех параметров X_i . В этом случае возможное значение Y находится в интервале:

$$Y = Y_0 \pm \Delta Y. \quad (1)$$

В случае проведения анализа погрешности Y_0 от погрешностей n параметров X_i ($i = 1, 2, \dots, n$), вместо (1) получаем:

$$Y_n = Y_{0n} \pm \Delta Y_n. \quad (2)$$

Используя понятие относительной чувствительности функционала Y по отношению к параметру X_i [4] $P_{Yi} = \lim_{\Delta x_i / \Delta x \rightarrow 0} \frac{\Delta Y / Y}{\Delta X_i / X_i}$, (3)

получим относительное изменение Y_0 из-за погрешностей параметров с точностью до величин второго порядка (параметры X_i независимы):

$$\frac{\Delta Y}{Y} = \sum_{i=1}^n P_{Yi} \times \frac{\Delta X_i}{X_i}, \quad (4)$$

где $\frac{\Delta X_i}{X_i}$ – относительное изменение параметра i .

В случае зависимости X_i между собой необходим более сложный анализ с учетом коэффициентов корреляции, что существенно усложняет задачу.

Метод Монте-Карло. Метод Монте-Карло (ММК) при определении ПИН основан на том, что погрешности входных параметров имеют вероятностный характер, т.е. их значения имеют определенную функцию распределения плотности вероятности с соответствующими числовыми характеристиками. Комбинации с помощью генератора случайных чисел вероятностных значений входных параметров приводят к функциям распределения плотности вероятности возможного значения функционала Y , когда возможные отклонения ΔY носят также вероятностный характер, т.е. доверительные интервалы с определенной вероятностью. Определение численных характеристик или распределение плотности вероятности таких отклонений можно связывать с понятием **анализ неопределенностей**.

Предлагаемое разделение понятий «погрешность» и «неопределенность» исходит из предпосылки, что для понятия «погрешность» в результатах расчета функционала $Y = f(X)$ возможные отклонения входных параметров X от принимаемого основного значения X_0 имеют детерминированное максимальное значение ΔX , в то время как для понятия «неопределенность» возможные отклонения значения параметра X носят вероятностный характер с некоторым распределением плотности вероятности, где X_0 есть среднеожидаемое значение, а ΔX связано с дисперсией этого распределения.

С помощью ММК был произведен анализ ПИН при оценке риска от АС в США [6]. Подход ММК отражен в статье Исламова Р.Т. [3, 7] и ряде других работ. В Европе для анализа теплогидравлических характеристик аварийных процессов на АС были использованы различные модификации, в том числе с применением формулы Уилкса [12].

Сомнения в достаточной корректности метода ММК при анализе ПИН высказаны в [8].

Метод теории нечетких множеств. Указанный метод обсуждается в [9,10] как один из методов анализа риска при недостаточной информации. Там же рассматриваются возможности применения этого подхода при анализе неопределенностей. Поскольку авторам данной статьи не известны работы по использованию данного метода применительно к задачам ОИАЭ, обсуждения возможности данного метода мы не будем касаться.

Метод квантильных оценок. Предложенный в [2] метод квантильных оценок (МКО) неопределенностей высокоэнтропийных логарифмических распределений является приближенным аналитическим методом анализа погрешностей, неизбежных при прогнозировании параметров редких событий в условиях значительной неопределенности в исходной информации и недостаточности знаний о механизмах возникновения и протекания таких процессов. Оценка точности самого метода выполнена с использованием сформулированных предельных теорем теории вероятностей для логарифмических распределений и прямым сравнением результатов, полученных с применением МКО, с результатами численного моделирования по ММК. Определены возможные максимальные погрешности МКО при анализе итоговых логарифмических распределений, не превышающие 5% в значениях средних квадратичных отклонений, 15% – в значениях медианы, 5%-го и 95%-го квантилей.

Показано, что применение МКО позволяет существенно, на 4–5 порядков, снизить затраты вычислительных операций в сравнении с ММК при обеспечении соизмеримой точности результатов анализа неопределенностей. Важным преимуществом МКО в сравнении с ММК является то, что МКО создает принципиально новые возможности для анализа ошибок при моделировании нестационарных аварийных процессов. Кроме того, применение МКО позволяет существенно расширить возможности экспертных систем анализа ситуаций и прогнозирования развития процессов.

Анализ имеющихся работ по оценке ПИН при расчете состояний и процессов на АС [3] показывает, что в большинстве случаев авторы к анализу конкретного состояния или процесса применяют выбранный ими метод оценки ПИН, не анализируя возможности и не сравнивая результаты других методов. Исключение представляет работа [8], где проводится сравнение результатов оценки неопределенностей по ММК и по методу МКО. Данный факт отражает общее состояние проблемы ПИН на сегодняшний день. Иметь результаты по выбранной методике проще и лучше, чем не иметь ничего. Провести анализ по нескольким методикам и сравнить результаты – это слишком большая работа, неподъемная не только для одного, но и для группы авторов. Целенаправленное исследование, где и при каких условиях лучше использовать ту или иную методику, не проводилось.

Учет результатов анализа ПИН при обосновании безопасности

Проведенный анализ ПИН по той или иной методике относительно рассчитанного ранее «базового» значения X_0 ставит вопрос о соотношении полученных характеристик ПИН с $X_{\text{доп}}$.

При получении характеристики ПИН в виде «погрешности» (согласно принятому термину, абсолютной или относительной) принимаемым условием может быть доказательство невыхода значения X_0 совместно со значением погрешности за $X_{\text{доп}}$. Данное требование кажется очевидным, но формально нигде не отражено и не комментируются условия его применения при обосновании безопасности.

Статьи

В случае вероятностного отклонения показателя X от X_0 вопрос о соотношении X_0 вместе с вероятностными отклонениями и допустимого значения $X_{\text{доп}}$ требует особого рассмотрения.

Ситуация осложняется тем, что действующая нормативная база и подстраиваемые под нее проектные критерии, призванные обеспечивать безопасность, в соответствии с детерминистским подходом требуют абсолютного соблюдения допустимых значений рассматриваемого показателя. Под этот принцип, кстати, подстраивается вся административная и уголовная ответственность за нарушение правил и норм. Реальность, однако, такова, что с малой, но с определенной степенью вероятности допустимые значения могут быть нарушены. Препятствием на пути отклонения значений X от X_0 должны стать ограничения на значения вероятностей таких отклонений, включая ограничения на вероятность выхода за $X_{\text{доп}}$.

В любом случае для вероятностного представления возможных отклонений X от X_0 необходимо иметь функцию распределения вероятности $F(X)$ и формирующую ее функцию плотности вероятности $f(X)$. В предположении $X_{\text{доп}} < X_0$ и $f(X)$ симметрично относительно значения X_0 , то вероятность превзойти $X_{\text{доп}}$ тем меньше, чем быстрее $F(X)$ стремится к 1 по мере возрастания X , т.е. чем уже распределение плотности вероятности (меньше среднеквадратичное отклонение σ , рис. 1).

Вероятность того, что X превзойдет значение $X_{\text{доп}}$, составит:

$$P_{\text{доп}} = 1 - F(X_{\text{доп}}). \quad (5)$$

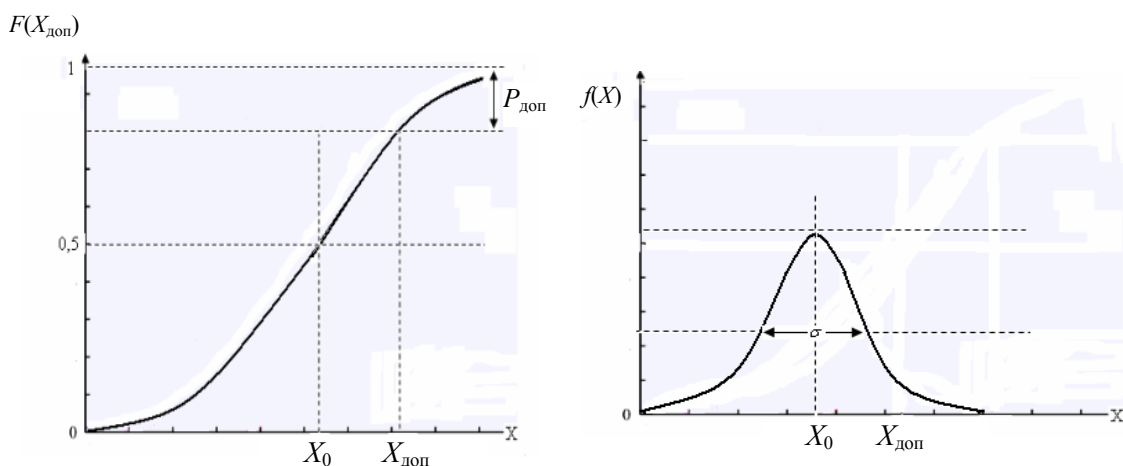


Рис. 1. Функции распределения вероятности и плотности вероятности с базовым и допустимым значением показателей X_0 и $X_{\text{доп}}$

При нормальном распределении $f(X)$ со среднеквадратичным отклонением σ , для разных значений безразмерного параметра
$$\frac{\Delta X}{\sigma} = \frac{X_{\text{доп}} - X_0}{\sigma} \quad (6)$$

вероятность отклонения X за значения $X_{\text{доп}}$, рассчитанная с учетом функции Лапласа [11], представлена в таблице.

Таблица

Вероятность $P_{\text{доп}}$ отклонения показателя X
в зависимости от $\frac{\Delta X}{\sigma} = \frac{X_{\text{доп}} - X_0}{\sigma}$

$\frac{\Delta X}{\sigma}$	0	1	2	3	4
$P_{\text{доп}}$	0,5	0,34	0,023	$1,3 \cdot 10^{-3}$	$3,3 \cdot 10^{-5}$

Таким образом, не достаточно для показателя X обозначить $X_{\text{доп}}$. Необходимо указать вероятность, с которой мы хотим гарантировать непревышение значения $X_{\text{доп}}$. Сделать это возможно (с получением функции распределения вероятности), проанализировав факторы, влияющие на неопределенность результатов. Как уже отмечалось, это принципиально новый момент в отечественной практике регулирования безопасности. Для внедрения такого подхода необходима разработка общей идеологии определения значений вероятности непревышения допустимых значений. Указанные вероятности по смыслу есть другая форма коэффициентов запаса с количественно-вероятностной их интерпретацией. Большая дисперсия полученного базового значения X_0 после анализа ПИН, согласно таблице, свидетельствует о высокой вероятности превышения допустимых значений.

Контурсы нормативного документа верхнего уровня (рамочный документ)

Анализ ПИН при обосновании безопасности – новый и достаточно трудоемкий процесс. Предлагается следующее название документа: «Основные подходы к оценке погрешностей и неопределенностей при обосновании безопасности объектов использования атомной энергии». Основная задача документа – зафиксировать обязательное требование представлять регулирующему органу в Отчете по обоснованию безопасности (ООб) анализ ПИН важных для безопасности показателей. Подчеркнем, что речь идет о результатах анализа показателей и состояний конкретного объекта, а не о ссылках на возможные методики.

В рамках данного документа невозможно и не предполагается определять номенклатуру ВБП для каждого ОИАЭ. Дается указание на необходимость разработки такого перечня по каждому из интересующих видов объектов в документах нижнего уровня по характерным тематическим направлениям. Там же необходимо разработать тематические направления анализа ПИН для данного вида объекта.

Ввиду разнообразия существующих и используемых методик оценки ПИН вопрос о рекомендуемых методиках по конкретному виду объекта и для отдельного тематического направления должен быть отнесен к специальным методическим указаниям. Отметим, что это один из сложных вопросов построения всего подхода к оценке ПИН в силу отмеченных в [1] противоречий в используемых на сегодняшний день подходах. Пока не ясно, нужно ли вообще предписывать использование конкретных методик или оставить этот вопрос на рассмотрение заявителя. В последнем случае существенно осложнится задача регулирующего органа и экспертизы, поскольку им предстоит дать оценку выбранной заявителем методики. Потребуется значительное время и большой объем совместной работы всех заинтересованных специалистов и организаций, прежде чем будет найдено решение этого вопроса.

В документе не следует фиксировать набор источников ПИН, по которым должен быть проведен анализ. Достаточно привести возможный перечень таких источников с предоставлением заявителю права выбора необходимых позиций для анализа с обоснованием принятых или отсутствующих источников.

Должна быть обозначена система необходимых нормативных документов низшего уровня в соответствии с приводимыми ниже соображениями.

Система нормативных документов в области анализа ПИН

Одним рамочным документом верхнего уровня не обойтись. Необходима целая система соответствующих документов.

На рис. 2 представлена схема предлагаемой системы нормативных документов для анализа ПИН. Под рассмотренным рамочным документом верхнего уровня, распространяющегося на все интересующие ОИАЭ, располагаются ветви документов низшего уровня (АС, радиохимический завод, пункты хранения РАО и др.). В первую очередь, необходимо сформировать ветвь документов для АС, как наиболее опасного вида объектов.

Первым документом каждой ветви вслед за рамочным документом будет документ, определяющий характерные черты данного ОИАЭ (тематические направления для анализа ПИН, необходимые для анализа источника погрешности и т.п.). Следующим документом для данного вида объекта могут быть рекомендуемые методические указания по проведению анализа ПИН для каждого тематического направления.

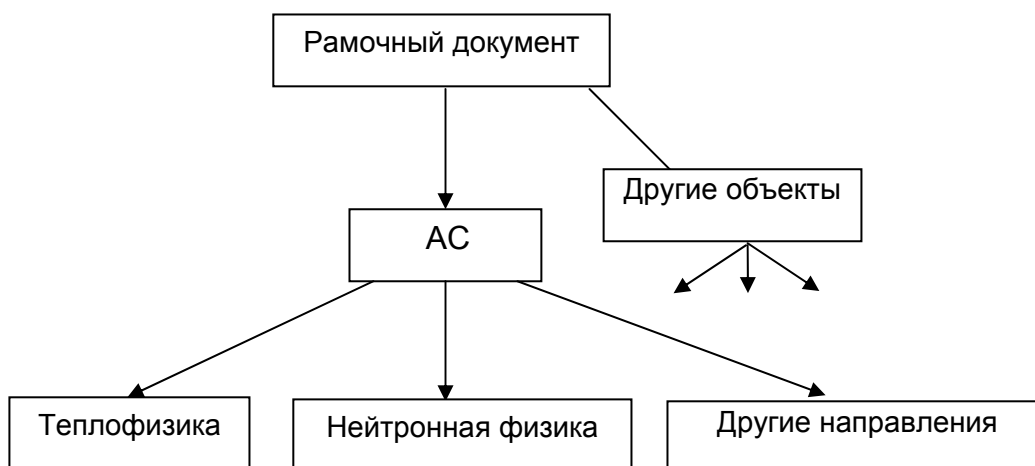


Рис. 2. Схема структуры системы нормативных документов в области анализа ПИН

Соотношения экспериментальных и расчетных данных при анализе ПИН

Проблема соотношения результатов эксперимента и расчета при обосновании безопасности носит многоплановый характер. Необходимое условие заключается в том, что все экспериментальные установки и получаемые с их помощью результаты должны соответствовать установленным требованиям проведения эксперимента и обработки результатов [11]. При представлении результатов эксперимента должен быть проведен и соответствующим образом оформлен анализ возможных погрешностей.

Экспериментальные данные по ПИН конечного интересующего показателя могут иметь прямое отношение к этому показателю, если есть возможность поставить прямой, т.е. интегральный эксперимент.

Результаты интегрального эксперимента и расчета могут сравниваться только при наличии анализа ПИН того и другого. Более достоверным будет результат с существенно меньшей дисперсией. Оценка погрешности расчета при сравнении с экспериментом может быть корректной только при обосновании значительно большей точности эксперимента.

При сравнении между собой результатов эксперимента и расчета с близкими по величине дисперсиями вывод о возможных значениях ПИН искомого показателя требует специального рассмотрения.

Поскольку интегральный эксперимент далеко не всегда возможен, важное значение имеют дифференциальные эксперименты и влияние погрешностей их результатов на погрешности конечного показателя. Результаты дифференциальных экспериментов с соответствующей оценкой ПИН являются входными данными для получения расчетным путем базовых значений необходимых показателей и анализа ПИН этих показателей.

В последние годы результаты дифференциальных и интегральных экспериментов, включаемые в анализ теплогидравлических процессов АС, кроме традиционной стандартной обработки результатов эксперимента, подвергаются сравнению с результатами вариационных расчетов [12]. Для обрабатываемого эксперимента определяется набор входных параметров кода, влияющих на неопределенность расчетного результата, вместе с функциями плотности вероятности входных параметров. В результате серии расчетов, выполненных при различных значениях параметров, определяются доверительные интервалы расчетных зависимостей. В случае если экспериментальные зависимости находятся в расчетном доверительном интервале, полученный набор входных параметров может быть использован для анализа неопределенности режимов на реальной установке после дополнения параметрами, отражающими ее специфику. Следует отметить, что подобный подход возможен при условии признания приоритета экспериментальных данных и после анализа адекватности экспериментальной и реальной установки, а также оценки точности эксперимента во всем рассматриваемом диапазоне.

Аналогичная ситуация наблюдается при анализе ПИН в области нейтронно-физических характеристик [12].

Следует остановиться на отношении к эксперименту при использовании атомной энергии как в военных, так и в мирных целях, и сравнить этот подход с подходом в других отраслях с тех-

нически сложными и опасными объектами, например в авиации, космосе, при создании ядерного оружия. Требование к проведению дифференциальных экспериментов для подтверждения работоспособности и надежности отдельных элементов и систем сложного и опасного объекта стало уже нормой и необходимой составной частью его разработки и сооружения. Работоспособность всего объекта в целом зависит от функционирования его частей в необходимых заданных пределах каждой из них по отношению к другим. Возможные отклонения параметров взаимодействия из-за их погрешностей и неопределенностей приводят к необходимости проводить интегральные эксперименты. В связи с этим возникает проблема, обусловленная экономическими возможностями и опасностью таких экспериментов.

С экономической точки зрения чрезмерно большие затраты на интегральный эксперимент «сталкиваются» с целесообразностью сооружения объекта. В определенных ситуациях чисто экономические критерии отодвигаются на второй план, так как государство вынуждено во главу угла ставить военные, политические и другие факторы. Безопасность объекта по отношению к населению зависит от вложенных средств, в данном случае – от затрат на интегральный эксперимент. Без интегрального эксперимента безопасность не может быть признана обеспеченной согласно действующим нормативным требованиям, сложившейся практике или по причине несогласия научной общественности. В этом случае возможны следующие крайние альтернативные действия. Либо государство идет в целях обеспечения безопасности будущего объекта на чрезмерные расходы по интегральному эксперименту, либо организует основательные теоретические исследования по обоснованию надежного функционирования сложной системы при наличии достаточной базы дифференциальных экспериментов. Последнее также требует определенных затрат и изменения в идеологии подхода при обосновании безопасности сложных систем. Приведенные альтернативы являются крайними случаями. Возможны также промежуточные варианты (полумасштабный интегральный эксперимент и соответствующие теоретические исследования).

Применительно к безопасности АС высказанные соображения сводятся к необходимости поиска оптимального соотношения между интегральным или полумасштабным экспериментом и теоретическими исследованиями. И то и другое в настоящее время нельзя назвать удовлетворительным.

Требования к оценке и учету результатов анализа погрешностей и неопределенностей при обосновании безопасности атомных станций

Поясним вышесказанное на примере обоснования безопасности с учетом анализа ПИН АС. Результаты таких анализов должны быть отражены в ООБ АС.

Аналізу подлежат следующие тематические направления:

- нейтронно-физические характеристики;
- теплогидравлические характеристики;
- прочностные характеристики;
- радиационные характеристики.

Для нейтронно-физических характеристик блока должна быть произведена оценка ПИН, в первую очередь, по следующим важным для безопасности показателям:

- коэффициент критичности для всех рассматриваемых в проекте состояний реактора;
- эффективность органов системы управления и защиты в различных предусмотренных проектом комбинациях их функционирования и состояниях реактора;
- мощностные, температурные, паровые и др. коэффициенты реактивности для всех рассматриваемых состояний реактора;
- величины нейтронного потока и флюенса в критических точках реактора;
- уровень мощности при физическом пуске реактора;
- уровень мощности при переходных процессах.

При получении теплогидравлических характеристик блока должна быть произведена оценка ПИН по следующим важным для безопасности показателям:

- максимальные температуры твэла (оболочки, сердечника) при нормальной эксплуатации;
- максимальные температуры твэла при переходных и аварийных процессах в критических точках по объему и во времени;
- объемное паросодержание (среднее по активной зоне);
- расход теплоносителя через активную зону при авариях с нарушением циркуляции теплоносителя;
- давление в первом контуре при авариях с потерей герметичности.

Приведенные показатели могут быть расширены при разработке ООБ. Также должны быть определены показатели для анализа других тематических направлений.

Заключение

Конечной целью решения предлагаемой проблемы ПИН является достижение такого положения, когда в обосновывающих материалах относительно важных для безопасности показателей ОИАЭ будет представлен анализ и приведены оценки возможных ПИН. Теоретические исследования по проблеме, погрешности результатов экспериментов, неточности используемых программных средств, анализ ошибки расчетчиков – все это является необходимыми этапами в достижении поставленной конечной цели.

В рамках поставленной цели в статье представлены следующие результаты, которые можно рассматривать как первые шаги по решению проблемы ПИН.

1. Предложен определенный набор терминов с их толкованием, необходимых для однозначного понимания обсуждаемых вопросов.
2. Рассмотрено различие в толковании терминов «погрешности» и «неопределенности».
3. Проведен обзор известных теоретических методов анализа ПИН.
4. В известных работах по анализу ПИН методы для определенных тематических направлений АС выбираются самими авторами анализа.
5. Обозначены рамки предлагаемого нормативного документа по требованиям проведения анализа ПИН и основные положения такого документа.
6. Приведена структура возможной системы нормативных документов разного уровня по проблеме ПИН.
7. Предложены показатели излагаемого подхода применительно к АС.

Дальнейшие усилия всех заинтересованных сторон должны быть объединены и направлены на развитие каждого этапа и достижение поставленной цели.

Литература

1. Ковалевич О.М., Строганов А.А. Погрешности и неопределенности при обосновании безопасности объектов использования атомной энергии. Атомная энергия, т.106, вып. 2, 2009.
2. Румянцев А.Н. Прогнозирование безопасности в ядерной энергетике. Атомная энергия, т. 102, вып. 2, 2007.
3. Точность и неопределенность программных средств, используемых для обоснования безопасности ОИАЭ. Сб. докл. Всерос. научно-практического семинара. М.: НТЦ ЯРБ, 2007.
4. Погрешности расчета защиты от излучений. Под редакцией В.П. Машкевича. М.: Энергоатомиздат, 1983.
5. Усачев Л.Н. Уравнение для ценности нейтронов, кинетика реактора и теория возмущений. Материалы международной конференции по мирному использованию атомной энергии. М.: Госэнергоиздат, 1958.
6. Sever Accident Risks: An Assessment for Five U.S. Nuclear Power Plants. NUREG-1150, 1990.
7. Исламов Р.Т. Анализ неопределенностей детерминистических моделей. Сб. докл. Всерос. научно-практического семинара. М.: НТЦ ЯРБ, 2007.
8. Румянцев А.Н. Квантильная оценка неопределенностей вероятностного анализа безопасности объектов ядерной энергетике. Атомная энергия, т. 101, вып.3, 2006.
9. Махутов Н. А. Конструкционная прочность, ресурс и техногенная безопасность. Часть 2. Новосибирск: Наука. 2005.
10. Коваленко О.В., Петрин С.В. Вероятностный анализ безопасности сложных систем. Сб. «Анализ безопасности установок и технологий». Часть 6. Саров. 2006.
11. ГОСТ Р ИСО 5725-2002. Части 1–6. Точность (правильность) и прецизионность методов и результатов измерений.
12. Парфенов Ю.В., Мелихов В.И., Мелихов О.И. Анализ неопределенности и чувствительности результатов расчета кодом АТЛЕТ экспериментального режима с большой течью теплоносителя на стенде БК В-213. Сб. докл. Всерос. научно-практического семинара. М.: НТЦ ЯРБ, 2007.