ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ЭКОЛОГИЧЕСКОМУ, ТЕХНОЛОГИЧЕСКОМУ И АТОМНОМУ НАДЗОРУ
(РОСТЕХНАДЗОР)

ПРИКАЗ

30 июня 2020 г № 288

Москва

Об утверждении руководства по безопасности при использовании атомной энергии «Рекомендации по оценке погрешностей и неопределенностей результатов расчетных анализов безопасности атомных станций»

В целях реализации полномочий, установленных подпунктом 5.3.18 пункта 5 Положения о Федеральной службе по экологическому, технологическому и атомному надзору, утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 30 июля 2004 г. № 401, приказываю:

Утвердить прилагаемое к настоящему приказу руководство по безопасности при использовании атомной энергии «Рекомендации по оценке погрешностей и неопределенностей результатов расчетных анализов безопасности атомных станций».

Врио руководителя А.В. Трембицкий

gost.e-ecolog.ru

УТВЕРЖДЕНО
приказом Федеральной службы
по экологическому, технологическому
и атомному надзору
от «30» июля 20 20 г. № 288

Руководство по безопасности
при использовании атомной энергии
«Рекомендации по оценке погрешностей и неопределенностей результатов расчетных анализов безопасности атомных станций»
(РБ-166-20)

I. Общие положения

1. Руководство по безопасности «Рекомендации по оценке погрешностей и неопределенностей результатов расчетных анализов безопасности атомных станций» (РБ-166-20) (далее – Руководство по безопасности) разработано в соответствии со статьей 6 Федерального закона от 21 ноября 1995 г. № 170-ФЗ «Об использовании атомной энергии» в целях содействия соблюдению требований пунктов 1.2.9 и 1.2.16 федеральных норм и правил в области использования атомной энергии «Общие положения обеспечения безопасности атомных станций» (НП-001-15), утвержденных приказом Федеральной службы по экологическому технологическому и атомному надзору от 17 декабря 2015 г. № 522 (зарегистрирован Минюстом России 2 февраля 2016 г., регистрационный № 40939).

2. Настоящее Руководство по безопасности содержит рекомендации Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору по оценке погрешностей и неопределенностей результатов детерминистических анализов безопасности атомных станций, выполняемых с использованием программ для электронно-вычислительных машин в целях обоснования безопасности.

3. Настоящее Руководство по безопасности предназначено для применения работниками эксплуатирующих организаций, сотрудниками структурных подразделений Ростехнадзора, работниками иных организаций, осуществляющих деятельность в области использования атомной энергии.

4. Перечень сокращений приведен в приложении № 1 к настоящему Руководству по безопасности, термины и определения – в приложении № 2.

II. Рекомендации по учету неопределенностей при проведении расчетных анализов безопасности атомных станций

5. При выполнении расчетных анализов безопасности АС с применением программ для ЭВМ рекомендуется анализировать и учитывать следующие неопределенности:

неопределенности, обусловленные допущениями и упрощениями, принятыми при разработке программы для ЭВМ, в том числе неопределенности, связанные с выбором метода численного решения используемой системы уравнений;

неопределенности, связанные с разбиением расчетной модели (исходными данными по геометрии моделируемого объекта, начальными условиями, а также сценарию моделируемого режима в совокупности с исполняемой версией программы для ЭВМ) на элементы (контрольные объемы, конечные элементы), с выбором шага интегрирования используемой в программе для ЭВМ системы уравнений;

неопределенности, обусловленные случайными событиями, такими как отказ оборудования, ошибка персонала;

неопределенности, обусловленные работой систем управления для поддержания режимных параметров РУ;

неопределенности геометрических размеров элементов и оборудования РУ;

неопределенности данных о свойствах веществ и материалов, принимаемых при проведении расчетов с помощью программы для ЭВМ;

неопределенности коэффициентов замыкающих соотношений, реализованных в программе для ЭВМ.

6. Результаты оценки неопределенностей, обусловленных упрощениями и допущениями, принятыми при разработке программы для ЭВМ, рекомендуется представлять в отчете о верификации и валидации программы для ЭВМ с целью обоснования корректности физико-математической модели программы для ЭВМ,

под которой понимаются уравнения, гипотезы, допущения, а также данные о физических константах и свойствах веществ и материалов, используемые в программе для ЭВМ для численного моделирования процессов и явлений, возможных на АС.

7. Разбиение расчетной модели на элементы (контрольные объемы, конечные элементы) и выбор шага интегрирования используемой в программе для ЭВМ системы уравнений рекомендуется обосновывать в отчете о верификации и валидации программы для ЭВМ либо в ООБ АС.

8. Неопределенности, обусловленные случайными событиями, такими как отказ оборудования, ошибка персонала, рекомендуется учитывать при составлении перечней проектных исходных событий и запроектных аварий АС.

9. Неопределенности, обусловленные работой систем управления, а также неопределенности геометрических размеров элементов и оборудования РУ, неопределенности данных о свойствах веществ и материалов, коэффициентов замыкающих соотношений рекомендуется учитывать при проведении детерминистического анализа безопасности АС. Рекомендации по использованию методов оценки этих неопределенностей представлены в главе III настоящего Руководства по безопасности.

10. В материалах, обосновывающих безопасность АС, рекомендуется подтверждать, что программа для ЭВМ используется в соответствии с областью применения, указанной в аттестационном паспорте.

11. При обосновании значений погрешностей результата расчетного анализа безопасности АС рекомендуется учитывать результаты валидации программы для ЭВМ, при этом:

результаты валидации программы для ЭВМ, установленные в пункте 2.5 аттестационного паспорта «Погрешность, обеспечиваемая программой для ЭВМ», рекомендуется использовать в качестве значений погрешностей результата расчетного анализа безопасности АС только в том случае, когда эта возможность обоснована в отчете по верификации и валидации программы для ЭВМ и указана в аттестационном паспорте;

в иных случаях расчетные анализы безопасности, выполненные с использованием программы для ЭВМ, рекомендуется сопровождать оценкой неопределенностей получаемых результатов.

12. В случае если обоснование применимости программы для ЭВМ выполняется на основе кросс-верификации с прошедшей валидацию и экспертизу в соответствии с установленным порядком программой для ЭВМ, то в качестве значения погрешности результата расчетного анализа безопасности АС в ООБ АС рекомендуется использовать величины погрешностей, установленные в пункте 2.5 аттестационного паспорта «Погрешность, обеспечиваемая программой для ЭВМ», прошедшей экспертизу, с учетом отклонений результатов расчетов по программам для ЭВМ и неопределенностей получаемых результатов.

13. Оценку неопределенностей результатов анализа проектных аварий АС рекомендуется выполнять с целью подтверждения консервативности подхода, принятого при выполнении указанного анализа.

14. Оценку неопределенностей результатов анализа проектных аварий рекомендуется представлять в ООБ АС для тех исходных событий из каждой группы аварийных режимов (образованных по принципу одинакового воздействия на АС), для которых по итогам расчетов по программе для ЭВМ, выполненных на основе консервативного подхода, продемонстрирован наименьший запас до достижения приемочных критериев. Блок-схема процесса оценки неопределенностей результатов расчетов проектных аварий АС приведена в приложении № 3 к настоящему Руководству по безопасности.

15. Результаты анализов запроектных аварий АС, выполненных с целью подтверждения соответствия приемочным критериям, принятым для параметров, важных для безопасности, рекомендуется сопровождать оценкой чувствительности (оценкой того, каким образом изменение значения одного параметра расчетной модели АС или параметра физико-математической модели программы для ЭВМ влияет на результат расчета по программе для ЭВМ) либо оценкой неопределенностей полученных результатов. В случае проведения оценки чувствительности результатов расчетов запроектных аварий АС ее рекомендуется

выполнять с целью выявления наихудшего из возможных состояний РУ АС в отношении параметра, сравниваемого с приемочным критерием. В случае проведения оценки неопределенностей результатов расчетов запроектных аварий АС ее рекомендуется выполнять с целью определения наиболее ожидаемого значения параметра, сравниваемого с приемочным критерием. При этом под наиболее ожидаемым значением параметра понимается его среднее значение, полученное на основе статистической обработки результатов вариантных расчетов по программе для ЭВМ с учетом погрешности, обеспечиваемой программой для ЭВМ при расчете указанного параметра, установленной в аттестационном паспорте. Описание подхода к определению наиболее ожидаемого значения параметра, важного для безопасности АС, при проведении расчетного анализа запроектных аварий АС приведено в приложении № 4 к настоящему Руководству по безопасности.

16. Оценку чувствительности и неопределенностей результатов анализа запроектных аварий АС рекомендуется представлять в ООБ АС для тех аварийных сценариев из перечня аварийных сценариев, обоснованных в ООБ АС, для которых по итогам выполнения расчета с применением программы для ЭВМ без оценки неопределенностей продемонстрированы наихудшие количественные значения параметров, сравниваемых с приемочным критерием.

17. Результаты анализа запроектных аварий АС, выполненные в качестве основы для разработки (подтверждения эффективности) РУЗА, рекомендуется сопровождать оценкой чувствительности с целью определения необходимого объема технических и организационных средств для приведения РУ в контролируемое безопасное состояние, установленное в РУЗА. При этом в ООБ АС рекомендуется представлять подход к определению необходимого объема расчетного обоснования, которое сопровождается оценкой чувствительности.

III. Рекомендации по использованию методов оценки неопределенностей

18. Оценку влияния неопределенностей геометрических размеров элементов и оборудования РУ, данных о свойствах веществ и материалов,

коэффициентов замыкающих соотношений, использованных в программе для ЭВМ, а также неопределенностей, обусловленных работой систем управления для поддержания режимных параметров РУ на результат расчетного анализа безопасности АС (далее – параметров, оказывающих влияние на результат расчетного анализа безопасности АС), рекомендуется выполнять с использованием:

статистических методов (метода Монте-Карло, метода, основанного на использовании соотношения Уилкса, метода, основанного на построении поверхностей отклика);

методов, основанных на обобщенной теории возмущения (методов линеаризации);

методов, основанных на использовании инженерных коэффициентов запаса;

комбинации статистических методов и методов, основанных на использовании инженерных коэффициентов запаса;

иных методов при условии их обоснования в ООБ АС или материалах, обосновывающих применение программы для ЭВМ.

При этом выбор метода оценки указанных неопределенностей рекомендуется обосновывать в ООБ АС.

19. Статистические методы и методы линеаризации рекомендуется применять для оценки статистических характеристик (толерантный интервал, доверительный интервал, среднее значение, стандартное отклонение) параметров, важных для безопасности АС, учитывая статистические характеристики (функцию распределения, диапазон изменения) параметров, оказывающих влияние на результат расчетного анализа безопасности АС.

20. Методы, основанные на использовании инженерных коэффициентов запаса, рекомендуется применять при выполнении расчетного анализа безопасности АС на основе консервативного подхода.

21. При выполнении оценки неопределенностей результата расчетного анализа безопасности АС по программе для ЭВМ, вне зависимости от используемого метода, в ООБ АС рекомендуется обосновывать выбор

параметров, оказывающих влияние на результаты указанного анализа, а также их статистические характеристики.

22. Обоснование выбора параметров, оказывающих влияние на результат расчетных анализов безопасности АС, для каждого из режимов рекомендуется выполнять путем проведения анализа чувствительности и/или с использованием экспертной оценки.

23. Функции распределения и диапазоны варьирования значений параметров, оказывающих влияние на результат расчетного анализа безопасности АС, рекомендуется принимать:

для амплитудно-частотных характеристик режимных параметров РУ, а также геометрических размеров и иных технологических параметров систем и элементов оборудования РУ – в соответствии с проектно-конструкторской документацией РУ;

для данных о свойствах веществ и материалов – в соответствии с документами по стандартизации в области использования атомной энергии и/или результатами аттестации справочных данных о свойствах веществ и материалов, проводимой в установленном порядке, и/или информацией, указанной в научно-технических справочниках;

для коэффициентов эмпирических уравнений, использованных в программе для ЭВМ – в соответствии с информацией, представленной в отчете о верификации и валидации программы для ЭВМ.

В случае отсутствия информации относительно функций распределения и диапазонов варьирования значений параметров, оказывающих влияние на результат расчетного анализа безопасности АС, рекомендуется обосновывать их выбор в ООБ АС, в том числе с использованием экспертной оценки.

24. При использовании для оценки неопределенностей результата расчетного анализа безопасности АС статистических методов рекомендуется:

выполнить одновременное варьирование параметров, оказывающих влияние на результат расчетного анализа безопасности АС, с использованием генератора псевдослучайных чисел;

провести необходимое количество вариантных расчетов с помощью программы для ЭВМ;

выполнить статистический анализ результатов указанных расчетов.

При этом, если целью статистического анализа является обоснование границ толерантных интервалов параметров, важных для безопасности АС, то рекомендуется проводить такое количество расчетов, чтобы обеспечить обоснование указанных границ с вероятностью не менее 0,95 при уровне доверия 0,95.

25. При сопоставлении границ толерантных интервалов параметра, важного для безопасности АС, и результатов расчетного анализа безопасности АС, полученных на основе консервативного подхода, рекомендуется сопоставить значения параметров, оказывающих влияние на результат расчетного анализа безопасности АС, принятые при проведении указанного анализа на основе консервативного подхода, с соответствующими значениями этих параметров, при проведении расчета с которыми получена граница толерантного интервала параметра, важного для безопасности АС.

26. При использовании для оценки неопределенностей результата расчетного анализа безопасности АС метода линеаризации рекомендуется:

продемонстрировать, что параметры, оказывающие влияние на результат расчетного анализа безопасности АС, являются взаимно независимыми, либо установить и оценить степень их зависимости путем вычисления коэффициента корреляции;

обосновывать доверительный интервал параметра, важного для безопасности АС, с доверительной вероятностью не менее 0,95 либо обосновывать для указанного параметра квантиль порядка не менее 95 %.

27. При использовании для оценки неопределенностей результата расчетного анализа безопасности АС методов, основанных на применении инженерных коэффициентов запаса, рекомендуется обосновывать указанные коэффициенты с доверительной вероятностью не менее 0,95 за исключением тех расчетов, в отношении которых коэффициенты запаса регламентируются

в федеральных нормах и правилах в области использования атомной энергии и документах по стандартизации в области использования атомной энергии.

ПРИЛОЖЕНИЕ № 1
к руководству по безопасности
при использовании атомной энергии
«Рекомендации по оценке погрешностей
и неопределенностей результатов расчетных
анализов безопасности атомных станций»,
утвержденному приказом
Федеральной службы по экологическому,
технологическому и атомному надзору
от «30» июля 2020 г. № 288

Перечень сокращений

АС	–	атомная станция
ООБ	–	отчет по обоснованию безопасности
РУЗА	–	руководство по управлению запроектными авариями
РУ	–	реакторная установка
ЭВМ	–	электронно-вычислительная машина
ASME V&V20-2009	–	стандарт ASME (American Society of Mechanical Engineers – американское общество инженеров-механиков) по верификации и валидации программ для ЭВМ в области вычислительной гидродинамики

ПРИЛОЖЕНИЕ № 2
к руководству по безопасности
при использовании атомной энергии
«Рекомендации по оценке погрешностей
и неопределенностей результатов расчетных
анализов безопасности атомных станций»,
утвержденному приказом
Федеральной службы по экологическому,
технологическому и атомному надзору
от «30» июня 2020 г. № 288

Термины и определения

В рамках настоящего Руководства по безопасности используются следующие термины и определения.

Валидация программы для электронно-вычислительных машин – процесс обоснования адекватности воспроизведения программой для ЭВМ физического явления (либо совокупности физических явлений) с оценкой погрешности результата расчета, выполненного с помощью программы для ЭВМ, проведенной путем сравнения указанных результатов расчетов с измерениями, выполненными на экспериментальных установках (с доказательством представительности экспериментов).

Верификация программы для электронно-вычислительных машин – процесс проверки того, что программа для ЭВМ работает корректно и не содержит ошибок программирования.

Кросс-верификация – сопоставление результатов расчетов по программе для ЭВМ с результатами расчетов по другой программе для ЭВМ, прошедшей экспертизу в установленном порядке.

Неопределенность результата расчета – неотрицательный параметр, характеризующий разброс значений, которые могли бы быть обоснованно приписаны рассчитываемой величине.

Погрешность результата расчета по программе для электронно-вычислительной машины – отклонение результата расчета параметра от опорного значения этого параметра, которое используют в качестве основы для сопоставления со значениями величин того же рода.

ПРИЛОЖЕНИЕ № 3
к руководству по безопасности
при использовании атомной энергии
«Рекомендации по оценке погрешностей
и неопределенностей результатов расчетных
анализов безопасности атомных станций»,
утвержденному приказом
Федеральной службы по экологическому,
технологическому и атомному надзору
от «30» июня 2020 г. № 288

Блок-схема процесса оценки неопределенностей результатов расчетов проектных аварий атомных станций

Блок-схема процесса оценки неопределенностей результатов расчетов проектных аварий АС представлена на рис. 1.

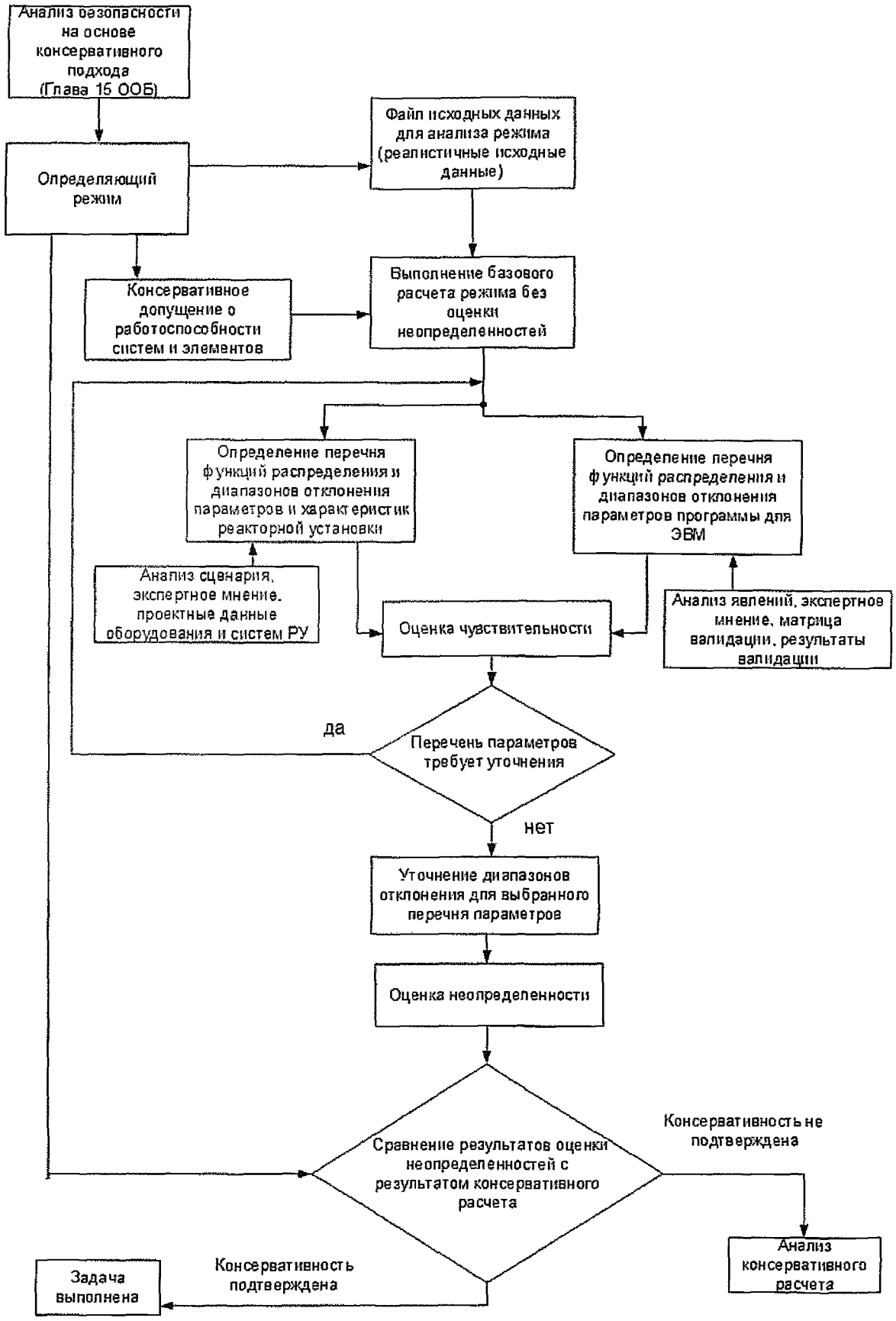


Рис. 1. Блок-схема процесса оценки неопределенностей результатов расчетов проектных аварий атомных станций

ПРИЛОЖЕНИЕ № 4
к руководству по безопасности
при использовании атомной энергии
«Рекомендации по оценке погрешностей
и неопределенностей результатов расчетных
анализов безопасности атомных станций»,
утвержденному приказом
Федеральной службы по экологическому,
технологическому и атомному надзору
от «30» июня 2020 г. № 288

Описание подхода к определению наиболее ожидаемого значения параметра, важного для безопасности атомных станций, при проведении расчетного анализа запроектных аварий атомных станций

1. Особенности оценки погрешности результатов расчетов по программе для электронно-вычислительных машин, предназначенной для моделирования запроектных аварий атомных станций, в процессе ее валидации

Для оценки погрешности результатов расчетов по программе для ЭВМ в процессе ее валидации рекомендуется использовать как эксперименты по отдельным процессам и явлениям, так и интегральные эксперименты, выполненные в условиях, приближенных к ожидаемым условиям на АС в ходе запроектной аварии. Результатом валидации программы для ЭВМ является оценка составляющей погрешности расчетов, связанной с упрощениями и приближениями физико-математических моделей, реализованных в программе для ЭВМ. Предлагаемый подход основывается на методике, описанной в стандарте ASME V&V20-2009.

Пусть D – значение параметра, измеренное в ходе эксперимента, использованного для валидации программы для ЭВМ, S – значение параметра, рассчитанное по программе для ЭВМ, T – «истинное» (неизвестное) значение параметра.

Введем следующие обозначения для погрешности результата расчета по программе для ЭВМ δ_S (отклонения результата расчета по программе для ЭВМ от «истинного» значения) и погрешности измерения в эксперименте,

использованном для ее валидации δ_D (отклонения результата измерения от «истинного» значения):

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

$$\delta_D = D - T. \quad (2)$$

Графическое представление введенных обозначений приведено на рис. 2.

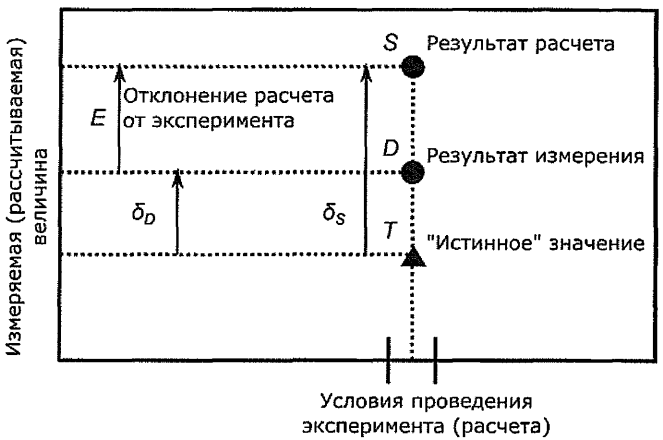


Рис. 2. Графическая иллюстрация используемых понятий при валидации программы для электронно-вычислительной машины

Отклонение E результата расчета S от результата измерения D можно выразить через погрешности δ_S и δ_D, учитывая выражения (1) и (2):

$$E = S - D = (S - T) - (D - T) = \delta_S - \delta_D. \quad (3)$$

Погрешность результата расчета по программе для ЭВМ δ_S имеет три составляющие:

δ_{model} – обусловленная упрощениями и допущениями, принятыми в физико-математической модели программы для ЭВМ;

δ_{num} – обусловленная численными методами, используемыми при проведении расчетов по программе для ЭВМ;

δ_{input} – обусловленная неполнотой знаний об исходных данных для расчета по программе для ЭВМ.

Таким образом, имеем:

$$\delta_S = \delta_{model} + \delta_{input} + \delta_{num}. \quad (4)$$

Целью валидации программы для ЭВМ в предлагаемом подходе является оценка погрешности δ_{model}, и для этого предложен следующий алгоритм. Комбинация выражений (3), (4) дает выражение для определения отклонения E:

$$E = \delta_S - \delta_D = \delta_{model} + \delta_{input} + \delta_{num} - \delta_D\,, \tag{5}$$

откуда получаем:

$$\delta_{model} = E - (\delta_{input} + \delta_{num} - \delta_D). \tag{6}$$

Смысл выражения (6) следующий: искомая погрешность δ_{model} определяется не только отклонением результата расчета от измеренного значения E, но и погрешностями, обусловленными неполнотой знаний об исходных данных, численных методах и измерениях. В частном случае, когда погрешностями δ_D, δ_{num} и δ_{input} можно пренебречь, погрешность δ_{model} совпадает с отклонением E.

В правой части уравнения (6) знак и модуль известны только для отклонения E. В предположении случайности и независимости всех величин в ASME V&V20-2009 вводится неопределенность валидации u_{val}:

$$u_{val} = \sqrt{u_{input}^2 + u_{num}^2 + u_D^2}\,, \tag{7}$$

где: u_{input}, u_{num}, u_D – стандартные неопределенности, соответствующие δ_{input}, δ_{num}, δ_D.

Неопределенность валидации программы для ЭВМ представляет собой оценку стандартного отклонения комбинации погрешностей $\delta_{input} + \delta_{num} - \delta_D$. Конечным количественным результатом валидации программы для ЭВМ является интервал $(\bar{E} - u_{val}; \bar{E} + u_{val})$, в котором находится δ_{model}. Неопределенность измерений u_D предполагается известной, поскольку ее оценка является составной частью эксперимента. Таким образом, задачей оценки неопределенностей, согласно ASME V&V20-2009, становится оценка неопределенностей u_{input} и u_{num}.

Для оценки неопределенности u_{input} требуется проведение вариантных расчетов по программе для ЭВМ с варьированием параметров ее расчетной

модели с последующей статистической обработкой результатов указанных расчетов. Среднее значение результатов вариантных расчетов по программе для ЭВМ $\bar{S}$ и неопределенность u_{input} определяются на основе несмещенных оценок математического ожидания и стандартного отклонения результатов вариантных расчетов по программе для ЭВМ.

Оценка неопределенности u_{num} основана на экстраполяции Ричардсона. Для этого выполняется сравнение результатов расчетов по программе для ЭВМ с использованием на нескольких сетках разной степени детальности. Сначала определяется порядок аппроксимации p для расчетного значения либо на основе информации об используемой численной схеме, либо из анализа на основе расчетов на трех сетках из следующей системы уравнений:

$$p = \frac{1}{ln(r_{21})}\left(ln|\varepsilon_{32}/\varepsilon_{21}| + q(p)\right); \quad (8)$$

$$q(p) = ln\left(\frac{r_{21}^{p} - s}{r_{32}^{p} - s}\right); \quad (9)$$

$$s = sign(\varepsilon_{32}/\varepsilon_{21}), \quad (10)$$

где:

p – порядок аппроксимации;

$r_{21} = (N_1/N_2)^{1/d} > 1$, $r_{32} = (N_2/N_3)^{1/d} >$ – коэффициенты измельчения сетки;

d – пространственная размерность сетки;

N_j – число элементов j-ой сетки, j меняется от 1 до 3;

$\varepsilon_{21} = S_2 - S_1$; $\varepsilon_{32} = S_3 - S_2$;

S_j – результат расчета по программе для ЭВМ на j-ой сетке, j меняется от 1 до 3.

Система уравнений (8) – (10) решается итерационным методом. Далее рассчитывается коэффициент сходимости по сетке GCI по следующей формуле:

$$GCI = \frac{F_s \cdot e_a^{21}}{r_{21}^{p} - 1}, \quad (11)$$

где:

F_s – коэффициент надежности, рекомендуемое значение которого составляет 1,25 для анализа с использованием трех и более сеток;

$e_a^{21} = |S_2 - S_1|$ – модуль разницы между результатами расчетов по программе для ЭВМ с использованием двух сеток.

Стандартная неопределенность u_{num} результатов расчета определяется по формуле:

$$u_{num} = GCI/k \ , \tag{12}$$

где k – коэффициент охвата, рекомендуемое значение которого составляет 1,15 для анализа с использованием трех и более сеток.

Метод валидации программы для ЭВМ ASME V&V20-2009 предлагает способ оценки погрешности ее расчетной модели с использованием только одного измерения, выполненного в ходе проведения эксперимента. Практический же интерес представляет оценка погрешности δ_{model}, которая выполнена на основе обработки совокупности измерений, полученных в широком диапазоне изменения начальных и граничных условий (например, при различных температурах и давлениях теплоносителя, схемах подачи мощности). С этой целью проведена адаптация методики, описанной в ASME V&V20-2009.

Введем среднее относительное отклонение $E_{n,\%}$ и относительную неопределенность $u_{input,n,\%}$, которые в предположении о независимости экспериментальных и расчетных данных можно определить по формулам:

$$E_{n,\%} = \frac{1}{N_{calc}} \sum_{k=1}^{N_{calc}} \frac{(S_n^k - \bar{D}_n)}{\bar{D}_n} = \frac{\bar{S}_n - \bar{D}_n}{\bar{D}_n}; \tag{13}$$

$$u_{input,n,\%}^2 = \frac{1}{N_{calc}-1} \sum_{k=1}^{N_{calc}} \frac{(S_n^k - \bar{S}_n)^2}{\bar{S}_n^2}, \tag{14}$$

где:

$\bar{D}_n$ – среднее значение результата измерения в эксперименте;

$\bar{S}_n$ – среднее значение результата расчета по программе для ЭВМ;

k – номер вариантного расчета.

В отличие от ASME V&V20-2009, здесь введен дополнительный индекс n для обозначения порядкового номера измерения в совокупности измерений, а под

$\overline{D}_n$ понимается результат усреднения нескольких повторных измерений. Относительная неопределенность валидации на n-м измерении находится аналогично (7):

$$u_{val,n,\%} = \sqrt{u_{input,n,\%}^2 \cdot \bar{S}_n^2/\bar{D}_n^2 + u_{num,n,\%}^2 \cdot \bar{S}_n^2/\bar{D}_n^2 + u_{D,n,\%}^2}. \quad (15)$$

Определим среднее относительное отклонение $\bar{E}_{\%}$ и неопределенность валидации программы для ЭВМ $\bar{u}_{val,\%}$ для совокупности измерений по формулам для среднего:

$$\bar{E}_{\%} = \frac{1}{N_{point}} \sum_{n=1}^{N_{point}} E_{n,\%}; \quad (16)$$

$$\bar{u}_{val,\%} = \frac{1}{N_{point}} \sum_{n=1}^{N_{point}} u_{val,n,\%}, \quad (17)$$

где N_{point} – число измерений в эксперименте.

Следует ожидать наличия разброса отклонений $E_{n,\%}$ и неопределенности валидации программы для ЭВМ $u_{val,n,\%}$, полученных для совокупности измерений. Для оценки этих разбросов вычислим дисперсии $E_{n,\%}$ и $u_{val,n,\%}$ по формулам:

$$u_{E,\%}^2 = \frac{1}{N_{point}-1} \sum_{n=1}^{N_{point}} \left(E_{n,\%} - \bar{E}_{\%}\right)^2; \quad (18)$$

$$u_{u,val,\%}^2 = \frac{1}{N_{point}-1} \sum_{n=1}^{N_{point}} \left(u_{val,n,\%} - \bar{u}_{val,\%}\right)^2. \quad (19)$$

Полную неопределенность валидации программы для ЭВМ определим по формуле сложения дисперсий:

$$u_{val,\%}^{tot} = \sqrt{\bar{u}_{val,\%}^2 + u_{E,\%}^2 + u_{u,val,\%}^2}. \quad (20)$$

Выражения (16), (20) позволяют оценить погрешность δ_{model} на совокупности измерений через интервал:

$$\delta_{model} \in \left(\bar{E}_{\%} - u_{val,\%}^{tot};\ \bar{E}_{\%} + u_{val,\%}^{tot}\right). \quad (21)$$

2. Особенности оценки неопределенностей результатов расчетов по программе электронно-вычислительных машин, предназначенной для моделирования запроектных аварий атомных станций, при проведении расчетного анализа безопасности

Целью оценки неопределенностей результата расчета запроектной аварии АС является определение наиболее ожидаемого значения параметра, важного для безопасности, а также статистических характеристик его разброса.

Принципиальной особенностью анализа безопасности АС в части тяжелых аварий является отсутствие измерений на натурном объекте в анализируемых режимах. В связи с этим, мы имеем картину, изображенную на рис. 3.

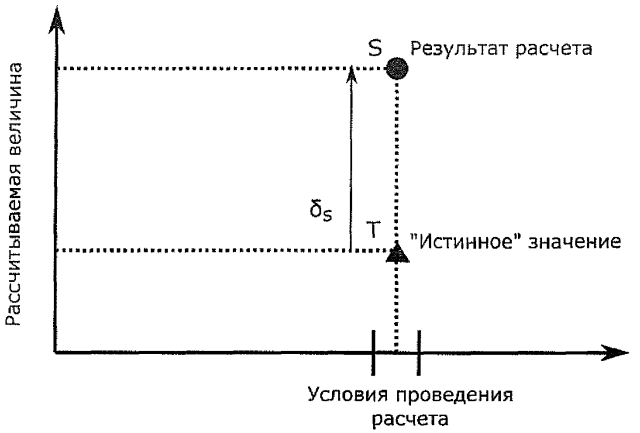


Рис. 3. Схематическое изображение относительного расположения результатов расчетов и «истинного» значения

Применяя ту же логику рассуждений, что и в разделе 1, имеем:

$$S - T = \delta_S = \delta_{model} + \delta_{input} + \delta_{num}, \quad (22)$$

где:

δ_{model} – составляющая погрешности результата расчета по программе для ЭВМ, обусловленная упрощениями и допущениями, принятыми в расчетной модели программы для ЭВМ;

δ_{input} – составляющая погрешности результата расчета по программе для ЭВМ, обусловленная неполнотой знаний об исходных данных для расчета по программе для ЭВМ;

δ_{num} – составляющая погрешности результата расчета по программе для ЭВМ, обусловленная численными методами, используемыми при проведении расчетов по программе для ЭВМ.

«Истинное» значение может быть выражено через результат расчета по программе для ЭВМ следующим образом:

$$T = S - (\delta_{model} + \delta_{input} + \delta_{num}) . \quad (23)$$

Значения величин в скобках в правой части выражения (23) не известны, но их можно оценить. Оценка δ_{input} и δ_{num} может быть выполнена с помощью стандартных неопределенностей u_{input} и u_{num}, а для величины δ_{model} можно использовать оценку, полученную в результате валидации программы для ЭВМ на экспериментах по отдельным процессам и явлениям и интегральных экспериментах. Основанием для переноса оценок δ_{model} на условия АС является идентичность определяющих процессов в этих экспериментах и в ожидаемых условиях на натурном объекте (хотя это общее утверждение должно быть обосновано в каждом конкретном случае). Оценка δ_{model} по методу, описанному выше, представлена двумя величинами: средним значением $\bar{E}$ и стандартной неопределенностью u_{val}. Полная величина стандартной неопределенности результата расчета по программе для ЭВМ может быть вычислена по формуле:

$$u_S^2 = u_{model}^2 + u_{input}^2 + u_{num}^2 , \quad (24)$$

где $u_{model} \equiv u_{val}$.

Метод вычисления неопределенности u_{num} описан в разделе 1.

Величины $\bar{S}$ и u_{input} оцениваются на основе проведения и последующей статистической обработки результатов вариантных расчетов по программе для ЭВМ.

Результатом оценки неопределенностей параметра, важного для безопасности, рассчитанного по программе для ЭВМ, является интервал для «истинного» значения результата расчета:

$$T \in (\bar{S} - \bar{E} - u_S;\ \bar{S} - \bar{E} + u_S) . \quad (25)$$

Отметим, что оценкой «истинного» значения T параметра, важного для безопасности, является наиболее ожидаемое значение $T \approx \bar{S} - \bar{E}$, а статистической характеристикой разброса значений является стандартная неопределенность u_S. При этом величина $\bar{E}$ может принимать как положительные, так и отрицательные значения.

В простом случае, когда погрешность расчетной модели программы для ЭВМ оценена с использованием результатов измерений, выполненных в ходе проведения только одного интегрального эксперимента, после предварительного преобразования соотношения (24) с учетом выражения (7) для u_{val} ($u_{model} \equiv u_{val}$) получим:

$$u_S^2 = \left(u_{input}^2 + u_{num}^2 + u_D^2\right)_{val} + u_{input}^2 + u_{num}^2 , \tag{26}$$

где индексом *val* обозначены величины, полученные при валидации программы для ЭВМ.

Рассматривая практические аспекты использования результатов оценок δ_{model}, приведенных в относительных единицах, укажем на то, что при оценке интервала для T удобнее использовать значения $\bar{E}$ и u_{val}, отнесенные к результатам расчетов по программе для ЭВМ:

$$\bar{E}_{\%} = \frac{\bar{S} - \bar{D}}{\bar{S}} ; \tag{27}$$

$$u_{input,\%}^2 = \frac{1}{N_{calc}-1} \sum_{k=1}^{N_{calc}} \frac{\left(S^k - \bar{S}\right)^2}{\bar{S}^2} ; \tag{28}$$

$$u_{D,\%}^2 = \frac{u_D^2}{\bar{S}^2} ; \tag{29}$$

$$u_{num,\%}^2 = \frac{u_{num}^2}{\bar{S}^2} . \tag{30}$$

Тогда все члены в скобке в правой части формулы (25) будут оценены в процентах относительно результата расчета $\bar{S}$ и интервал для абсолютного «истинного» значения будет выглядеть следующим образом:

$$T \in \left(\bar{S} - \bar{S} \cdot \bar{E}_{\%} - \bar{S} \cdot u_{S,\%};\ \bar{S} - \bar{S} \cdot \bar{E}_{\%} + \bar{S} \cdot u_{S,\%}\right) . \tag{31}$$

При валидации программы для ЭВМ в качестве нормирующих значений для оценки диапазона δ_{model} использовались результаты измерений в эксперименте:

$$\bar{E}^*_{\%} = \frac{\bar{S}-\bar{D}}{\bar{D}}; \quad (32)$$

$$u^{2*}_{val,\%} = \frac{u^2_{val}}{\bar{D}^2}. \quad (33)$$

Из формулы (32) можно выразить:

$$\frac{\bar{D}}{\bar{S}} = \frac{1}{1+\bar{E}^*_{\%}}. \quad (34)$$

Подставляя формулы (34) в (27), получим выражение, связывающее $\bar{E}_{\%}$ и $\bar{E}^*_{\%}$:

$$\bar{E}_{\%} = \frac{\bar{S}-\bar{D}}{\bar{S}} = \frac{\bar{S}-\bar{D}}{\bar{D}} \cdot \frac{\bar{D}}{\bar{S}} = \frac{\bar{E}^*_{\%}}{1+\bar{E}^*_{\%}}. \quad (35)$$

Аналогично для неопределенности валидации программы для ЭВМ:

$$u^2_{val,\%} = \frac{u^2_{val}}{\bar{S}^2} = \frac{u^2_{val}}{\bar{D}^2} \cdot \frac{\bar{D}^2}{\bar{S}^2} = \frac{u^{2*}_{val,\%}}{\left(1+\bar{E}^*_{\%}\right)^2}. \quad (36)$$

Таким образом, для того, чтобы использовать результаты валидации программы для ЭВМ, нормированные на результаты измерений, их значения нужно умножить на величину $\frac{\bar{D}}{\bar{S}} = \frac{1}{1+\bar{E}^*_{\%}}$.

gost.e-ecolog.ru