



Федеральная служба
по экологическому, технологическому и атомному надзору



Федеральное государственное учреждение
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЦЕНТР
ПО ЯДЕРНОЙ И РАДИАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ
(НТЦ ЯРБ)

УТВЕРЖДЕНО
Приказ НТЦ ЯРБ
№ 46 от 04.10.2010 г.

ВВЕДЕНО В ДЕЙСТВИЕ
С 1 февраля 2011 г.

МЕТОДИЧЕСКИЙ ДОКУМЕНТ

по безопасности объектов использования атомной энергии

Рекомендации по сопоставлению рассчитанной и измеренной реактивности при обосновании ядерной безопасности реакторных установок типа ВВЭР

РАССМОТРЕНО:

Научно-техническим советом НТЦ ЯРБ
«30» сентября 2010 г.

Документы научно-технической поддержки Ростехнадзора,
разрабатываемые НТЦ ЯРБ

Москва, 2010 г.

Настоящий документ содержит рекомендации по сопоставлению измеренных и рассчитанных значений реактивности и величин, с помощью нее определяемых, прежде всего эффективности аварийной защиты для реакторов ВВЭР. Документ разработан в соответствии с НП-082-07 «Правила ядерной безопасности реакторных установок атомных станций» [1], РД-03-33-2008 «Инструкция об организации экспертизы программных средств, применяемых при обосновании и (или) обеспечении безопасности объектов использования атомной энергии» [2], РД-03-34-2000 «Требования к составу и содержанию отчета о верификации и обосновании программных средств, применяемых для обоснования безопасности объектов использования атомной энергии» [3] и МД «Методические рекомендации по экспертизе и верификации программных средств по направлению «нейтронная физика» [4].

Выпускается впервые.

Окончательная редакция документа выполнена Попыкиным А.И.

СОДЕРЖАНИЕ

ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ	4
1. Назначение и область применения	5
2. Общие положения	6
3. Определения	9
4. Рекомендации по расчету реактивности и расчетному моделированию измерения реактивности реакторов ВВЭР и рекомендации к соответствующим ПС	11
4.1. Рекомендации по расчету реактивности	11
4.2. Рекомендации к расчетному моделированию измерения реактивности	11
5. Сопоставление рассчитанной и измеренной реактивностей	13
5.1. Рекомендации к представлению результатов расчета реактивности	13
5.2. Рекомендации к представлению результатов измерения реактивности	13
5.3. Рекомендации к представлению результатов расчетного моделирования измерения реактивности	14
6. Рекомендации по определению эффективности АЗ и погрешности ее определения, на основании сопоставления рассчитанной, измеренной и полученной в результате расчетного моделирования измерения реактивности	16
7. Рекомендации по определению эффектов и коэффициентов реактивности параметров, на основании сопоставления рассчитанной измеренной и полученной в результате расчетного моделирования измерения реактивности	18
8. Рекомендации к верификации кодов для расчетного моделирования измерения реактивности	20
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	21

ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

АЗ	аварийная защита
АЭС	атомная электростанция
ВВЭР	водо-водяной энергетический реактор
ВК	верхний концевик ОР СУЗ
МКУ	минимальный контролируемый уровень (мощности)
ОИАЭ	объект использования атомной энергии
НК	нижний концевик ОР СУЗ
НФ/ТГ	совместный нестационарный нейтронно-физический и теплогидравлический расчет
ОР	орган регулирования СУЗ
ПС	программное средство
СВРК	система внутриреакторного контроля
РУ	реакторная установка
СУЗ	система управления и защиты

1. Назначение и область применения

1.1. Документ определяет понятия реактивности, эффектов и коэффициентов реактивности.

1.2. Документ содержит рекомендации:

- а) по сравнению измеренных и рассчитанных значений реактивности и величин, с помощью нее определяемых, прежде всего эффективности аварийной защиты;
- б) по необходимым расчетным возможностям и применению ПС для расчетного моделирования реактивности;
- в) по верификации и экспертизе (аттестации) ПС для расчетного моделирования измерений реактивности;
- г) по определению погрешности расчета эффективности аварийной защиты на основании сопоставления измеренной и рассчитанной реактивностей;
- д) по определению других параметров, важных для безопасности, которые определяются на основании измеренной реактивности, и сопоставлению этих параметров с рассчитываемыми значениями.

1.3. Документ разработан на основании научных исследований, проведенных в НТЦ ЯРБ.

2. Общие положения

2.1. Понятие реактивности играет существенную роль в обеспечении, обосновании и регулировании ядерной безопасности и используется в различных состояниях ОИАЭ – от условий нормальной эксплуатации до запроектных аварий. В нормативных документах [1], [5] понятие реактивности так же используется достаточно широко, но определение его не дано. Что касается документа [1], то он в большей своей части посвящен ограничениям на величину и изменение реактивности в РУ АЭС, что только подчеркивает особую важность этого понятия. Вместе с тем, с понятием реактивности связаны величины, которые являются проектными и эксплуатационными пределами: скорость введения положительной реактивности, эффекты и коэффициенты реактивности, эффективность органов регулирования и аварийной защиты. Их значения должны быть обоснованы в проекте РУ, а некоторые из них должны подтверждаться в процессе эксплуатации на действующих РУ, в том числе и путем измерений.

2.2. Наиболее распространенное (привычное) определение реактивности, например, в нормативных документах МАГАТЭ, США (см. п.3.1.1) и некоторых российских, не вполне отвечает существующим методикам и результатам измерений реактивности. Это относится к измерениям, при которых мощность реактора меняется на несколько порядков за короткий промежуток времени, например, при измерении эффективности аварийной защиты, при измерениях в подкритическом состоянии, при измерениях, в процессе которых следует учитывать работу систем и оборудования РУ. По мере развития ПС для проведения нестационарных расчетов по сопровождению эксплуатации появилась возможность численно оценить возникающие несоответствия. В настоящее время интерпретация этих расхождений различается.

2.3. В результате перечисленного выше возникает ряд проблем, таких как различное понимание результатов расчетов и измерений. Это приводит к

проблемам, например, при определении эффективности аварийной защиты, эффективности аварийной защиты с учетом застревания на ВК наиболее эффективного стержня, интерпретации значительных расхождений измеренных и рассчитанных коэффициентов реактивности и т.д.

2.4. Эффекты и коэффициенты реактивности определяются путем измерений на действующих энергоблоках. Диапазон изменения мощности при их измерениях является небольшим, поэтому упомянутая выше причина различной интерпретации рассчитанных по стационарным ПС и полученных в результате расчетного моделирования измерения величин не является определяющей. Однако источником различия этих величин может быть интерпретация самих величин в соответствии с методикой их расчетов по стационарным ПС и нестационарным моделированием измерения. При расчетном моделировании измерений по разным ПС могут быть различия, связанные с отличающимся учетом в расчетной модели систем и оборудования РУ, влияющих на значение измеренной реактивности.

2.5. Отсутствие единых подходов к сопоставлению реактивности, полученной в результате расчета и в результате измерений, вызывает проблемы, относящиеся к верификации ПС. Они заключаются в определении погрешности отдельных параметров для включения их в Приложение к аттестационному паспорту, когда методология верификации основывается на сравнении с данными измерений. Это так же отражается на корректности накапливаемых баз данных по измерениям и их расчетной оценке.

2.6. Основные различия возникают при сравнении измеренной реактивности и измеряемых с ее помощью величин с величинами, рассчитанными по стационарным и нестационарным расчетным моделям. Далее под расчетным моделированием мы будем понимать использование для расчета ПС нестационарного распределенного трехмерного НФ/ТГ.

2.7. Проектные пределы и соответствие им таких величин, как эффективность аварийной защиты и коэффициенты реактивности, устанавливаются как результаты расчетов по аттестованным ПС

стационарного моделирования работы РУ. При верификации упомянутых кодов, согласно документу [4], используются измерения на действующих РУ. Эти величины могут быть использованы для консервативного анализа безопасности, например, в точечной модели динамики РУ.

2.8. Для интерпретации измерений в подкритическом состоянии большую роль играет распределенный источник нейтронов. Под ним понимается распределенный по активной зоне источник нейтронов, не включающий мгновенные и запаздывающие нейтроны деления. Он, в основном, формируется за счет нейтронов спонтанного деления и реакции (γ , n) на легких изотопах.

3. Определения

3.1. Реактивность (Р):

$$3.1.1. \rho = 1 - 1/k_{\text{eff}}, \quad (1)$$

где k_{eff} – эффективный коэффициент размножения. Эффективный коэффициент размножения рассчитывается из решения стационарной задачи расчета РУ. Он является коэффициентом баланса генерации нейтронов и суммарных поглощения и утечки.

3.1.2. Эффективный коэффициент размножения определяется из решения стационарной задачи расчета РУ – это отношение полной генерации нейтронов к суммарным поглощению и утечке. Далее, величина ρ будет называться так же рассчитанной реактивностью. Эта реактивность рассчитывается по ПС стационарного расчета РУ.

3.2. Измеренная реактивность – реактивность, измеренная реактиметром (приборным комплексом) на основании сигнала по потоку нейтронов (нейтронной мощности) от одного или нескольких внутри или внезонных датчиков.

3.3. Определение реактивности, полученной в результате расчетного моделирования измерения – реактивность, полученная в результате расчетного моделирования реактиметра, параметры которого, используемые в расчете, должны совпадать с реактиметром, с помощью которого производятся измерения. При этом рекомендуется выполнить следующие условия. Распределение потока нейтронов (нейтронной мощности) в активной зоне должно быть рассчитано по ПС совместного нестационарного распределенного полномасштабного НФ/ТГ РУ. Значение потоков нейтронов в месте расположения внезонных датчиков реактиметра рекомендуется рассчитать по ПС с известной погрешностью.

3.4. Реактиметр – прибор (измерительный комплекс), фиксирующий изменение потока нейтронов (нейтронной мощности) с помощью датчиков, расположенных внутри или вне активной зоны, и производящий первичную обработку сигнала с целью получения измеренной реактивности по заранее известному определению (закону) или алгоритму. В измерительный комплекс

может входить статистическая обработка первичных результатов при получении окончательного значения реактивности.

3.5. Эффект реактивности – это изменение реактивности в результате изменения одного из параметров РУ, например, мощности, температуры топлива, температуры теплоносителя, концентрации жидкого поглотителя (борной кислоты), концентрации ксенона и т.д. При этом должен быть указан интервал изменения параметра.

3.6. Коэффициент реактивности – эффект реактивности, отнесенный к величине изменения соответствующего параметра, при этом предполагается, что все остальные параметры остаются постоянными.

4. Рекомендации по расчету реактивности и расчетному моделированию измерения реактивности реакторов ВВЭР и рекомендации к соответствующим ПС

4.1. Рекомендации по расчету реактивности

4.1.1. Реактивность следует рассчитывать по стационарным ПС-имитаторам активной зоны реактора.

4.1.2. Расчет реактивности проводится по аттестованным ПС. В Приложение к аттестационному паспорту ПС в пункте 2.6 рекомендуется указывать погрешность расчета эффективного коэффициента размножения и соответствующего ему распределения мощности.

4.2. Рекомендации к расчетному моделированию измерения реактивности

4.2.1. Для расчетного моделирования измерения реактивности следует использовать ПС нестационарного распределенного совместного НФ/ТГ РУ. При этом в расчетное моделирование РУ рекомендуется включать моделирование оборудования, работа которого оказывает существенное влияние на измерение реактивности.

4.2.2. Рекомендуется использовать ПС, которые содержат версию (часть), предназначенную для стационарного расчета РУ. Погрешность основных параметров стационарного состояния РУ, рассчитанных по ПС моделирования измерений реактивности, должна быть не выше погрешности соответствующих параметров, рассчитанных по ПС, используемых для сопровождения эксплуатации.

4.2.3. ПС для расчетного моделирования реактивности следует иметь одну и ту же библиотеку малогрупповых диффузионных констант (сеточных коэффициентов), что и ПС, используемое для расчета реактивности.

4.2.4. В ПС следует включить расчетную модель реактиметра.

4.2.5. В ПС рекомендуется реализовать возможность расчета потока нейтронов в месте расположения датчика сигнала, обрабатываемого реактиметром.

4.2.6. В ПС следует реализовать возможность расчета источника нейтронов и расчета распределения потока нейтронов от источника нейтронов.

4.2.7. Расчетное моделирование измерений реактивности проводится по аттестованным ПС. Приложение к аттестационному паспорту должно содержать погрешности величин, расчет которых предусматривается в п.п. 4.2.5-7.

5. Сопоставление рассчитанной и измеренной реактивностей

5.1. Рекомендации к представлению результатов расчета реактивности

5.1.1. Реактивность R рассчитывается по аттестованному стационарному ПС-имитатору активной зоны. Если расчет реактивности проводится на МКУ мощности, т.е. обратными связями можно пренебречь, в формуле для определения реактивности (1) эффективный коэффициент размножения является собственным значением стационарной задачи.

5.1.2. Рекомендуется указать данные об аттестации ПС, по которому проводится расчетное моделирование, и сведения о методике расчета в объеме, необходимом для сопоставления, но не меньшем, чем содержащемся в п. 3 «Сведения о методиках расчета, реализованных в ПС» и п.4 «Сведения о базах данных (библиотеках констант), используемых в ПС» Приложения к аттестационному паспорту ПС.

5.1.3. Рекомендуется представить сведения о конкретном расчете:

- картограмму загрузки активной зоны с подробной характеристикой входящих в загрузку кассет;
- сведения о начальном (невозмущенном) состоянии активной зоны;
- сведения о вводимом возмущении;
- сведения о конечном состоянии активной зоны;
- величину рассчитанной реактивности.

5.2. Рекомендации к представлению результатов измерения реактивности

5.2.1. Рекомендуется приводить результаты измерений по утвержденным методикам.

5.2.2. Рекомендуется указывать константы запаздывающих нейтронов, используемые в реактиметре или ПС, его заменяющем

5.2.3. Рекомендуется вместе с измеренной реактивностью по реактиметру (приборному комплексу) приводить, по возможности, токи

ионизационной камеры, и другие параметры, измеренные в течение переходного процесса, необходимые для расчетного моделирования.

5.2.4. При проведении статистической и/или любой другой первичной обработки сигнала, рекомендуется приводить сведения об алгоритме (применяемой методике) обработки.

5.3. Рекомендации к представлению результатов расчетного моделирования измерения реактивности

5.3.1. Расчетное моделирование измерения реактивности проводится по аттестованному ПС. При этом в п. 2.1 Приложении к аттестационному паспорту следует указать, что ПС предназначено для расчетного моделирования измерения реактивности.

5.3.2. Рекомендуется указать необходимые характеристики стационарного состояния РУ перед моделированием измерения реактивности (см. п.3.1.3).

5.3.3. Рекомендуется перечислить системы РУ, включая СУЗ, систему внутриреакторного контроля и комплекс аппаратуры контроля нейтронного потока, работа которых учитывается при моделировании измерений и привести сведения об адекватности и погрешностях моделирования.

5.3.4. Рекомендуется привести результаты и погрешность расчета источника нейтронов, если он необходим.

5.3.5. Рекомендуется привести сценарий измерения реактивности.

5.3.6. Рекомендуется привести параметры, используемые в модели реактиметра.

5.3.7. Рекомендуется привести методику и исходные данные (со ссылкой на библиотеку ядерных данных), которые использовались для вычисления параметров запаздывающих нейтронов в нестационарных уравнениях, описывающих диффузию нейтронов в активной зоне.

5.3.8. Рекомендуется привести сведения об адаптации модели реактиметра в конкретном расчете. Под этим понимается использование

взаимной нормировки показаний реактиметра и результатов, полученных в результате его расчетного моделирования.

5.3.9. В результаты расчетного моделирования рекомендуется включить:

- изменение параметров РУ в процессе расчетного моделирования;
- рассчитанную реактивность по модели реактиметра;
- реактивность (Р), полученную в результате стационарного расчета по ПС расчетного моделирования измерения реактивности;
- расчетное изменение тока ИК в процессе моделирования измерения реактивности.

5.4. Сопоставление рассчитанной, измеренной и полученной в результате расчетного моделирования измерения реактивности

5.4.1. Рекомендуется указывать константы запаздывающих нейтронов, используемых в реактиметре или ПС, моделирующем реактиметр.

5.4.2. Для сопоставления рассчитанной, измеренной и полученной в результате расчетного моделирования реактивности в документах, обосновывающих безопасность РУ, в том числе эксплуатационную, рекомендуется привести:

- а) Результаты сравнения измеренной реактивности и реактивности, полученной в результате расчетного моделирования, т.е. рассчитанной по модели реактиметра, содержащейся в ПС расчетного моделирования измерения реактивности.
- б) Результаты сравнения рассчитанной реактивности по стационарному ПС-имитатору активной зоны и по стационарной части ПС моделирования измерения реактивности.
- в) Погрешности величин, о которых говорится в п.п. а) и б).

6. Рекомендации по определению эффективности АЗ и погрешности ее определения, на основании сопоставления рассчитанной, измеренной и полученной в результате расчетного моделирования измерения реактивности

6.1. Согласно НП-082-07 (ПБЯ РУ АС) минимальная эффективность АЗ должна быть достаточной для перевода РУ в подкритическое состояние в любой момент времени в состоянии активной зоны с наибольшей критичностью без нарушения проектных пределов. Она должна быть обоснована в проекте РУ и разделяется для состояний на МКУ мощности и на номинальной мощности. В настоящее время для реактора ВВЭР эффективность АЗ рассчитывается перед началом работы очередной топливной загрузки согласно руководящим документам эксплуатирующей организации [6], [7]. Для подтверждения расчетного значения эффективности аварийной защиты проводятся измерения на МКУ мощности. Измерения и их обработка проводятся согласно методикам, изложенным в руководящих документах эксплуатирующей организации [8], [9]. Сопоставление расчетов и измерений проводится в соответствии с документами [6], [7].

6.2. Расчетная эффективность АЗ, определяется по абсолютной величине как разность между двумя (обратными) эффективными коэффициентами размножения, рассчитанными в 2-х стационарных состояниях, начальном и конечном. В начальном состоянии все ОР СУЗ, за исключением ОР регулирующей группы, находятся на ВК, состояние является критическим. В конечном состоянии все ОР СУЗ находятся на НК, остальные параметры берутся из первого состояния, т.е. ОР СУЗ перемещаются мгновенно.

6.3. Измеренной эффективностью АЗ считается изменение реактивности, измеренное реактиметром в результате перемещения всех ОР СУЗ на НК, обработанное по методике, изложенной в РД ЭО 0151-2004 [9].

6.4. Эффективностью АЗ, полученной в результате расчетного моделирования считается изменение реактивности, полученное в результате расчета по модели реактиметра, содержащейся в ПС, применяемом для расчетного моделирования. Начальное состояние при расчетном моделировании измерения эффективности АЗ должно совпадать с начальным состоянием, определенным в п.6.2.

6.5. Погрешность эффективности АЗ, полученной в результате расчета (см. п.6.2) с учетом сопоставления измеренной и рассчитанной реактивности рекомендуется приводить в Приложении к аттестационному паспорту ПС для расчетного моделирования реактивности. Если для расчета реактивности и моделирования измерений реактивности используются разные ПС, то определение погрешности рекомендуется приводить в документе, обосновывающем безопасность очередной загрузки, в котором содержатся сопоставление измеренных и рассчитанных величин.

7. Рекомендации по определению эффектов и коэффициентов реактивности параметров, на основании сопоставления рассчитанной измеренной и полученной в результате расчетного моделирования измерения реактивности

7.1. Измерение и обработку измерений эффектов и коэффициентов реактивности, эффективности отдельных ОР СУЗ, групп ОР СУЗ, дифференциальной эффективности групп ОР СУЗ рекомендуется проводить по утвержденным методикам.

7.2. Рекомендации по определению эффективности ОР СУЗ (или групп ОР СУЗ) определяемых посредством сброса из критического состояния, или сброса в подкритическом состоянии (доброса) и погрешностей этих величин совпадают с рекомендациями п.6 сформулированными для аварийной защиты.

7.3. Расчетное моделирование дифференциальной и интегральной эффективности групп при компенсации их борной кислотой, эффектов и коэффициентов реактивности по борной кислоте, выполняемых на МКУ мощности в окрестности критического состояния, можно проводить, как по стационарным ПС-имитаторам работы РУ, так и по ПС нестационарного совместного НФ/ТГ расчета.

7.4. Расчетное моделирование измерений эффектов и коэффициентов реактивности в соответствии с условиями, изложенными в п.7.3, компенсация которых происходит за счет обратных связей в процессе измерения, за счет компенсации ОР СУЗ и других эффектов, например, возможного изменения эффективности ОР СУЗ в процессе измерения, рекомендуется проводить по ПС совместного нестационарного НФ/ТГ расчета. В ПС, предназначенных для расчетного моделирования измерений следует предусмотреть моделирование работы необходимых систем РУ, а в Приложении к аттестационному паспорту ПС в п.2.6 рекомендуется включить параметры, изменения которых существенны для измерения.

7.5. Погрешности расчетных величин коэффициентов и эффектов реактивности, выполненные по ПС-имитаторам реактора, рекомендуется определять с учетом расчетного моделирования измерений.

8. Рекомендации к верификации кодов для расчетного моделирования измерения реактивности

8.1. По рубриктору (см. раздел 15 руководящего документа [3]), указанные в заголовке раздела 8 ПС соответствуют ПС нейтронно-физического расчета, являющиеся самостоятельными модулями динамических ПС. В документе [4] ПС для моделирования измерений, в том числе для измерений реактивности, рассматриваются отдельно и для их верификации даны конкретные рекомендации.

8.2. Входящую в ПС расчетного моделирования измерений реактивности часть (блок), либо отдельное ПС расчета потока нейтронов в месте расположения ИК (вне активной зоны), рекомендуется аттестовать с учетом рекомендаций раздела 3 документа [4].

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Правила ядерной безопасности реакторных установок атомных станций. НП-082-07.
2. Инструкция об организации экспертизы программных средств, применяемых при обосновании и (или) обеспечении безопасности объектов использования атомной энергии. РД-03-33-2008.
3. Требования к составу и содержанию отчета о верификации и обосновании программных средств, применяемых для обоснования безопасности объектов использования атомной энергии. РД-03-34-2000.
4. Методические рекомендации по экспертизе и верификации программных средств по направлению «нейтронная физика». Методический документ. Отчет НТЦ ЯРБ, инв. № ДНП-050-31/2009, 2009г.
5. Общие положения обеспечения безопасности атомных станций. ОПБ-88/97. НП-001-97. (ПНАЭ Г-01-011-97)
6. Номенклатура эксплуатационных нейтронно-физических расчетов и измерений для топливных загрузок ВВЭР-440. РД ЭО 1.1.2.0500-2008, 2008г.
7. Номенклатура эксплуатационных нейтронно-физических расчетов и измерений для топливных загрузок ВВЭР-1000. РД ЭО 1.1.2.0501-2008, 2008г.
8. РД ЭО 0150-2004. Типовые программы и методики проведения физических экспериментов на энергоблоках атомных электростанций с реакторами ВВЭР-1000.
9. РД ЭО 0151-2004. Методика расчёта нейтронно-физических характеристик по данным физических экспериментов на энергоблоках атомных электростанций с реакторами ВВЭР-1000.