

Нормативное регулирование в области обеспечения сейсмостойкости важных для безопасности систем и элементов энергоблоков АЭС

- Казновский П. С., канд. техн. наук, ОАО “Атомтехэнерго”
- Казновский А. П.¹, ОАО “Атомтехэнерго”
- Сааков Э. С., доктор техн. наук, ОАО “Атомтехэнерго”
- Рясный С. И., доктор техн. наук, ОАО “Атомтехэнерго”

Рассмотрена структура нормативных документов, учитывающая многоуровневый анализ сейсмостойкости АЭС и интеграцию работ, связанных с обеспечением сейсмостойкости систем и элементов АЭС, и комплекс мероприятий по вводу в эксплуатацию новых и продлению сроков эксплуатации действующих энергоблоков АЭС. Рассмотрена роль и место в этой структуре вновь разработанного методического нормативного документа МТ 1.2.2.04.0069-2012, дополняющего действующую нормативную базу в части методических требований к определению собственных динамических характеристик систем и элементов АЭС и позволяющего на основе знания этих характеристик гарантировать адекватность оценок сейсмостойкости и устойчивости к другим видам внешних воздействий.

Ключевые слова: сейсмостойкость, оборудование АЭС, землетрясение, безопасность АЭС, нормативное регулирование.

События последних лет на японских АЭС Касивадзаки-Карива и Фукусима продемонстрировали всему миру актуальность задачи гарантированного обеспечения устойчивости и безопасности АЭС при сейсмических и других внешних воздействиях.

Требования к сейсмостойкости оборудования АЭС, критерии сейсмостойкости, их дифференциация по степени ответственности оборудования за ядерную и радиационную безопасность, определение сейсмических воздействий и другие факторы, определяющие порядок и условия проверки и обеспечения сейсмостойкости оборудования, регламентируются национальными нормативными документами и обобщающими их рекомендациями МАГАТЭ. Поскольку АЭС являются объектами чрезвычайно высокой ответственности, к безопасности которых предъявляются особо жёсткие требования, при их проектировании, сооружении, эксплуатации и реконструкции в современных нормативных документах предписывается учёт значительно больших сейсмических воздействий по сравнению с обычными гражданскими и промышленными объектами [1]. Нормативные документы периодически уточняются (с тенденцией ужесточения требований) по мере накопления данных по параметрам землетрясений и их последствиям, углубления знаний в области динамики и

прочности конструкций, их математического и технического обеспечения, а также по мере изменения и уточнения общих правил и норм по безопасности АЭС.

Развитие нормативного регулирования сейсмической безопасности АЭС. Первые атомные станции проектировались в соответствии с нормативными документами, предназначенными для гражданских и обычных промышленных объектов. Впервые в нашей стране сейсмостойкость сооружений, оборудования и трубопроводов главного циркуляционного контура анализировалась применительно к Армянской АЭС в 1975 – 1978 гг.

В 1978 г. был разработан и введён в действие документ ВСН-15-78 “Временные нормы проектирования сейсмостойких атомных станций”. При составлении этих норм учли нормативные документы США, Японии, Франции, Румынии и рекомендации МАГАТЭ. Были введены два уровня расчётных землетрясений (ПЗ и МРЗ), три категории сейсмостойкости и дифференциация требований к сейсмостойкости зданий, сооружений, систем и их элементов по категориям.

В 1986 г. при пересмотре нормативного документа “Нормы расчёта на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок” в него был введён новый раздел, посвящённый анализу сейсмостойкости оборудования и трубопроводов. Введённый в действие в 1987 г. (взамен ВСН-15-78) документ ПНАЭ

¹ Казновский Арсений Павлович: kaznovskyap@atech.ru

Г-5-006-87 “Нормы проектирования сейсмостойких атомных станций” сохранил основные принципы и подходы ВСН-15-78. В 1987 г. были разработаны, утверждены и введены в действие “Требования к размещению атомных станций”, которыми предписывались детальные исследования сейсмичности площадок при выборе районов размещения новых АЭС. Согласно введённому в действие в 1990 г. нормативному документу ПНАЭ Г-1-011-89 “Общие положения обеспечения безопасности атомных станций (ОПБ-88)”, системы и элементы, важные для безопасности, должны быть способны в соответствии с перечисленными специальными нормами и правилами выполнять свои функции в установленном проектом объёме с учётом землетрясений. Документ был пересмотрен в 1997 г. (ОПБ-88/97), но в части требований к обеспечению сейсмической безопасности АЭС остался без изменений.

Новое развитие проблема обеспечения сейсмостойкости АЭС получила в последнее десятилетие XX века после сильного землетрясения, произошедшего в декабре 1988 г. в Армении. В 1993 г. был разработан и введён в действие нормативный документ ПНАЭ Г-3-33-93 “Размещение атомных станций. Основные критерии и требования по обеспечению безопасности”. Введённый в действие в 1995 г. нормативный документ ПНАЭ Г-5-035-94 “Учёт внешних воздействий природного и техногенного происхождения на ядерно- и радиационно опасные объекты” содержал откорректированные требования к обеспечению сейсмостойкости АЭС и других атомных объектов. В развитие нормативного документа ПНАЭ Г-5-006-87 был подготовлен в новой редакции и введён в действие документ НП-031-01 “Нормы проектирования сейсмостойких атомных станций”. Нормы устанавливают требования к обеспечению безопасности наземных атомных станций с реакторами всех типов при сейсмических воздействиях, к определению категории сейсмостойкости элементов атомных станций с учётом их класса безопасности, к назначению параметров конструкций и оснований сооружений, технологического, электро-технического оборудования, средств автоматизации и связи. Кроме того, в них содержатся рекомендации по составу и объёму исследований для уточнения сейсмических и тектонических условий размещения атомных станций и определения параметров внешних воздействий для оценки эффективности унифицированных проектных решений сейсмостойкости атомных станций применительно к конкретным условиям размещения.

В 2006 г. введены в действие федеральные нормы и правила НП-064-05 “Учёт внешних воздействий природного и техногенного происхождения на объекты использования атомной энергии”, согласно которым при обосновании безопасности и надёжности энергоблоков АЭС при внешних воз-

действиях (в том числе сейсмических) обязательным является изучение динамических характеристик (затухания и собственных частот) важных для безопасности систем и элементов (кроме зданий и сооружений) методом прямых экспериментальных исследований и динамических испытаний.

Действующие документы, регулирующие обеспечение сейсмостойкости. Таким образом, в области разработки, проектирования, изготовления, монтажа, эксплуатации, ремонта и продления сроков службы сейсмостойкого оборудования АЭС в настоящее время действуют три основных нормативных документа:

НП-031-01 “Нормы проектирования сейсмостойких атомных станций”;

ПНАЭ Г-7-002-86 “Нормы расчёта на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок”;

НП-064-05 “Учёт внешних воздействий природного и техногенного происхождения на объекты использования атомной энергии”.

Эти документы базируются на нормативных правилах и требованиях по безопасности АЭС ОПБ-88/97, а при их разработке широко использован мировой и отечественный опыт и рекомендации МАГАТЭ. Кроме перечисленных, действуют специальные нормативные документы для отдельных видов оборудования:

НП-043-03 “Требования к устройству и безопасной эксплуатации грузоподъёмных кранов для объектов использования атомной энергии”;

НП-068-05 “Трубопроводная арматура для атомных станций. Общие технические требования”.

В этих документах достаточно определённо установлены только общие требования к сейсмостойкости систем и элементов АЭС, обязательные для применения при проектировании АЭС, а именно: балльность площадок размещения АЭС, категории сейсмостойкости, общие требования и виды подтверждения сейсмостойкости оборудования и общие рекомендации по выполнению расчётов сейсмостойкости оборудования при проектировании.

Помимо перечисленных нормативных документов, действует ряд стандартов, устанавливающих методические требования в части подтверждения сейсмостойкости оборудования и систем АЭС, методы испытаний оборудования по подтверждению сейсмостойкости, вибропрочности, собственных динамических характеристик, а также методы расчётов или экспериментально-расчётных проверок:

ГОСТ 17516.1-90 “Изделия электротехнические. Общие требования в части стойкости к механическим внешним воздействующим факторам”;

ГОСТ 30546.1-98 “Общие требования к машинам, приборам и другим техническим изделиям и

методы расчёта их сложных конструкций в части сейсмостойкости”;

ГОСТ 30546.2-98 “Испытания на сейсмостойкость машин, приборов и других технических изделий”;

ГОСТ 30546.3-98 “Методы определения сейсмостойкости машин, приборов и других технических изделий, установленных на месте эксплуатации, при их аттестации или сертификации на сейсмическую безопасность”;

ГОСТ 30630.1.1-99 “Методы испытаний на стойкость к механическим внешним воздействующим факторам машин, приборов и других технических изделий. Определение динамических характеристик конструкций”.

Требования действующих нормативных документов регламентируют многоуровневый анализ сейсмостойкости важных для безопасности систем и элементов АЭС, к которым относятся системы аварийного и планового расхолаживания, спринклерные системы, системы защиты 1-го контура от превышения давления, системы гидроремкостей САОЗ и др.:

1) на стадии проектирования данных систем проводятся расчёты на прочность в соответствии с ПНАЭ Г-7-002-86, включающие возможные нагрузки от сейсмических и иных видов внешних воздействий;

2) после изготовления оборудования (при наличии технических возможностей) проводятся стендовые испытания в соответствии с ГОСТ 17516.1-90, ГОСТ 30546.1,2,3-98, при которых на специальных виброплатформах моделируются внешние воздействия;

3) при вводе в эксплуатацию после завершения монтажа систем и оборудования проводятся поэлементные проверки устойчивости к сейсмическим и другим внешним воздействиям важных для безопасности систем и элементов АЭС, включающие экспериментальное определение динамических характеристик в реальных условиях раскрепления и обвязки оборудования с внедрением при необходимости компенсирующих мероприятий.

Такой комплексный подход к оценке фактической сейсмостойкости важных для безопасности систем и элементов может гарантировать безопасность российских АЭС при сейсмических воздействиях.

Актуальность усовершенствования действующей нормативной базы. Сейсмические нагрузки на оборудование АЭС существенно зависят как от собственных частот объекта, так и от демпфирующих процессов и характеристик (декрементов колебаний) в области резонансных частот (рис. 1).

Собственные частоты и значения декрементов колебаний оборудования на стадиях его разработки и изготовления определяются расчётным путём и проверяются при лабораторных испытаниях, од-

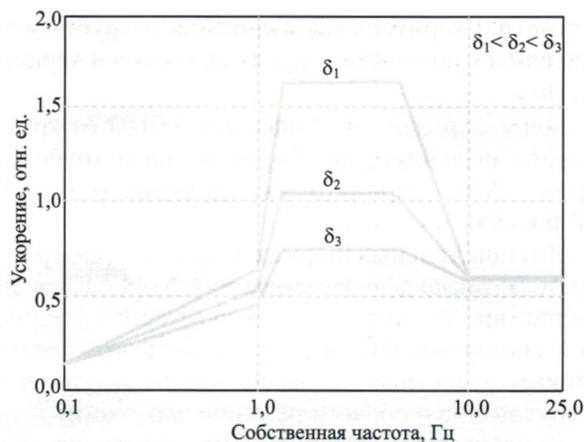


Рис. 1. Качественный вид спектра ответов при землетрясении:

δ – декремент колебаний

нако эти данные не являются надёжными как из-за ограниченных возможностей расчётных схем, математических программ, вычислительной и экспериментальной техники, так и, в первую очередь, по принципиальной невозможности учесть на этой стадии условия монтажа, раскрепления оборудования и его динамического взаимодействия с опорными и несущими конструкциями, трубопроводной обвязкой, теплоизоляционными покрытиями. Ввиду резонансного характера сейсмических воздействий определённые расчётным путём собственные частоты колебаний, даже при отличии от реальных всего на 1 Гц, могут привести к ошибке в оценке сейсмического воздействия на оборудование в несколько раз.

Действующие нормативные документы однозначно определяют чрезвычайную важность знаний о реальных собственных динамических характеристиках (частотах и декрементах колебаний) оборудования и их учёта при обосновании сейсмостойкости. В документе НП-031-01 при отсутствии прямых экспериментальных данных рекомендуется (регламентируется) использовать при расчётах сейсмостойкости строительных конструкций, оборудования и трубопроводов фиксированные значения относительных декрементов колебаний (в долях от критического значения, равно 2π для первой основной формы колебаний), представленные в таблице.

Однако эти рекомендации содержат ряд несообразностей или, по крайней мере, неточностей: непонятно, какие значения δ следует принимать в области $0,67R < \sigma < 0,9R$; сомнительны (более того, не подтверждаются последними экспериментальными данными, полученными на АЭС) различные значения δ для стальных конструкций на болтах и на сварных соединениях, а также для оборудования и трубопроводов диаметром более и менее 300 мм, поскольку на затухание колебаний, помимо вида соединений конструкций и размеров

(диаметра) корпусов оборудования и трубопроводов, влияет множество других факторов и характеристик.

Более определенное значение δ (0,02 от критического значения) для оборудования и трубопроводов АЭС принято в документе ПНАЭ Г-7-002-86.

В национальных нормах США и ряда других стран, а также в рекомендациях МАГАТЭ в последнее время это значение искусственно увеличено и составляет 0,05 и даже больше, что заметно снижает расчётные сейсмические воздействия на оборудование в области резонансных частот и тем самым сокращает материальные затраты на обеспечение сейсмостойкости, однако это достигается за счёт снижения достоверности и надёжности результатов, т.е. повышением риска аварийных ситуаций при землетрясениях.

Обширный фактический материал по демпфированию различного оборудования в реальных условиях монтажа, раскрепления и обвязки на пусковых и действующих энергоблоках АЭС с реакторами РБМК-1000 и ВВЭР-1000 (№ 1 Калининской АЭС, № 1 – 4 Ленинградской АЭС, № 1 Ростовской АЭС) показывает, что примерно 20% обследованного оборудования различного типа имеют относительные декременты от 0,05 до 0,20 (т.е. даже выше, чем в новых нормативах США), в 70% случаев эти значения составляют от 0,02 до 0,05 и выявлены случаи (около 10%), когда относительные декременты оказались менее 0,02 (до 0,006) [2].

В связи с изложенным, требование нормативного документа НП-064-05, регламентирующее обязательное изучение динамических характеристик важных для безопасности систем и элементов методом динамических испытаний и по сути предписывающее обязательную заключительную проверку сейсмостойкости оборудования непосредственно

на АЭС в реальных условиях монтажа, раскрепления и обвязки, является жизненно актуальным при вводе в эксплуатацию новых энергоблоков АЭС и особенно при переоценке уровня безопасности энергоблоков, подлежащих продлению срока эксплуатации и спроектированных без учёта сейсмических воздействий либо по устаревшим исходным данным и нормативным требованиям.

Следует отметить, что при всей важности данного требования документ не устанавливает методические требования к определению собственных динамических характеристик, необходимые объёмы обследований в условиях стационарных систем и не конкретизирует дальнейшее использование результатов обследований. При этом большая часть перечисленных ранее документов, содержащих методические требования по подтверждению сейсмостойкости и собственных динамических характеристик систем и оборудования АЭС, нуждается в пересмотре и совершенствовании. Это касается, прежде всего, требований в части методик натурных испытаний, применяемой при испытаниях аппаратуры, использования современных оптимизированных алгоритмов обработки получаемых экспериментальных данных, а также требований по составлению расчётных моделей оборудования и др.

Методика натурального подтверждения динамических характеристик систем и элементов энергоблоков АЭС. Потребность в разработке новых и совершенствовании действующих нормативных документов в области обеспечения сейсмостойкости оборудования АЭС связана, прежде всего, с интенсивным строительством и расширением географии строительства новых энергоблоков АЭС, а также с модернизацией и продлением сроков эксплуатации действующих энергоблоков и, как следствие, с увеличением объёмов обследований сейсмостойкости систем и элементов энергоблоков АЭС. Так, если несколько лет назад комплексные обследования сейсмостойкости с использованием расчётно-экспериментальных методов, основанных на натурном определении собственных динамических характеристик, выполнялись не более чем на одном энергоблоке в течение одного года, то в настоящее время возникает задача выполнения комплексных обследований на двух-трёх и более энергоблоках в год. При этом должны обследоваться основные системы, относящиеся к I категории сейсмостойкости по НП-031-01, которые могут насчитывать до нескольких тысяч единиц оборудования, а сроки, в которые необходимо проводить натурные испытания, могут ограничиваться несколькими неделями, выделяемыми на плано-предупредительный ремонт.

В свете изложенного тем более актуальной является задача нормативного регулирования в части

Декременты колебаний δ (в долях от критического значения) в соответствии с НП-031-01

Вид конструкции	Расчётные напряжения σ в зависимости от расчётных сопротивлений материала конструкции R	
	$\sigma = 0,67R$	$\sigma \geq 0,9R$
Железобетонные конструкции:		
обычные	0,04	0,07
преднапряжённые	0,02	0,05
Стальные конструкции:		
сварные	0,02	0,04
на болтах	0,04	0,07
Оборудование и трубопроводные системы:		
большого диаметра (> 300 мм)	0,02	0,03
малого диаметра (≤ 300 мм)	0,01	0,02

методических требований к определению собственных динамических характеристик с последующим обоснованием устойчивости к сейсмическим и другим внешним воздействиям систем и элементов АЭС, для решения которой в ОАО “Атомтехэнерго” разработан принципиально важный и актуальный отраслевой нормативный документ МТ.1.2.2.04.0069-2012 “Методика подтверждения динамических характеристик систем и элементов энергоблоков АЭС, важных для безопасности” [3].

Документ введён в действие приказом ОАО “Концерн Росэнергоатом” с 01.05.2012 г. и является обязательным для всех пусковых и подлежащих продлению сроков эксплуатации энергоблоков.

Методика учитывает требования действующих федеральных нормативных документов и устанавливает требования к техническим средствам проведения измерений и испытаний, методы испытаний и алгоритмы обработки экспериментальных данных, рекомендации по верификации расчётных моделей исследуемого оборудования. Принципиальным отличием методики от перечисленных методических нормативных документов (ГОСТ) является то, что при её разработке учтён многолетний опыт (обследовано более 4000 единиц и 500 типов по всей номенклатуре тепломеханического и электротехнического оборудования АЭС с реакторами РБМК, ВВЭР-440, ВВЭР-1000) и особенности, характерные для расчётно-экспериментальных обследований сейсмостойкости оборудования в условиях станционных систем.

В новую методику вошли усовершенствованные алгоритмы и принципиально новые методы обработки экспериментальных данных [4, 5], рекомендации по учёту результатов испытаний при составлении расчётных моделей оборудования в аттестованных в России программных комплексах, рекомендации по процедуре проведения испытаний, включая выбор метода испытаний, выбор средств испытаний и измерений, рекомендации по выбору точек установки датчиков и приложения динамических воздействий для возбуждения затухающих колебаний в зависимости от типов и видов исследуемого оборудования.

Структура документов, регулирующих обеспечение сейсмостойкости. На рис. 2 показана сложившаяся в настоящее время структурная схема специальной нормативной документации, регулирующей обеспечение сейсмостойкости оборудования и систем АЭС. Данная схема учитывает многоуровневый анализ сейсмостойкости оборудования АЭС, охватывающий стадии его проектирования, изготовления и ввода в эксплуатацию в условиях станционных систем, и, в целом, соответствует принятой структуре системы нормативной документации по вводу в эксплуатацию энергоблоков АЭС [6].

В состав документов, относящихся к первому, концептуальному, уровню вошли “Общие положе-



Рис. 2. Структурная схема нормативной документации по обеспечению сейсмостойкости оборудования АЭС

ния обеспечения безопасности АЭС” и серия № 110 МАГАТЭ – Безопасность ЯУ.

Во второй, регламентный, уровень вошли НД, конкретизирующие и раскрывающие положения документов первого уровня и относящиеся к стадии проектирования систем и оборудования АЭС (НП-031-01, НП-64-05, ПНАЭ-Г-7-002-86, НП-043-03, НП-068-05), к тому же дополненные общими стандартными требованиями к ПНР. Также в регламентный уровень вошли нормы по безопасности МАГАТЭ серии NS-G-1.6.

К третьему, методическому (1-й подуровень), уровню относятся методические документы, в которых изложены рекомендации для реализации НД регламентирующего уровня – стандарты, содержащие методы определения сейсмостойкости (ГОСТ 17516.1-90, 30546.1,2,3-98, 30630.1.1-99), проектная и техническая документация на оборудование (технические условия, рекомендации, указания) и требования к технической документации по вводу в эксплуатацию или по продлению сроков службы эксплуатации. К этому же уровню относится и новый нормативный документ – МТ 1.2.2.04.0069-2012.

И, наконец, к четвёртому, методическому (2-й подуровень), уровню относятся методические документы локального характера, в которых изложены требования по обследованию сейсмостойкости конкретных систем и оборудования, утверждаемые и устанавливаемые непосредственно обследуемым объектом, – программы и методики по обоснованию сейсмостойкости оборудования и требования к отчётной документации ПНР или ПСЭ.

Выводы

1. В связи с отсутствием в действующих в России федеральных и отраслевых нормативных документах методических требований к определению собственных динамических характеристик с последующим обоснованием устойчивости к сейсмическим и другим внешним воздействиям систем и элементов АЭС, в ОАО “Атомтехэнерго” разработан новый отраслевой нормативный документ МТ 1.2.2.04.0069-2012 “Методика подтверждения динамических характеристик систем и элементов энергоблоков АЭС, важных для безопасности”, своевременно дополняющий структуру действующей нормативной базы и устраняющий ряд неточностей, связанных с нормативным обеспечением сейсмостойкости систем и элементов АЭС.

2. Внедрение методики МТ 1.2.2.04.0069-2012 как обязательной в общую структуру нормативных документов, регулирующих обеспечение

сейсмостойкости оборудования АЭС, позволит с высокой надёжностью определять реальные собственные динамические характеристики (частоты и декременты колебаний) оборудования и на основе знания этих характеристик гарантировать адекватность оценок сейсмостойкости и устойчивости к другим видам внешних воздействий систем и элементов АЭС при вводе в эксплуатацию новых энергоблоков и при продлении сроков эксплуатации действующих.

Список литературы

1. *Сейсмическая безопасность атомных станций* / Ананьев А. Н., Казновский П. С., Казновский С. П., Лебедев В. И., Чеченов Х. Д. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2011.
2. *Встовский Г. В., Казновский П. С., Казновский А. П.* Фактическая статистика декрементов колебаний оборудования АЭС. – Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций, 2009, № 2.
3. *МТ. 1.2.2.04.0069-2012.* Методика подтверждения динамических характеристик систем и элементов энергоблоков АЭС, важных для безопасности. Концерн “Росэнергоатом”, 2012.
4. *Встовский Г. В., Казновский П. С., Казновский А. П.* Спектральный метод определения декрементов механических колебаний по результатам динамических испытаний. – Заводская лаборатория, 2008, т. 74, № 6.
5. *Встовский Г. В., Казновский П. С., Казновский А. П.* Функциональные аспекты оценки сейсмостойкости по данным динамических испытаний. – Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций, 2008, № 6.
6. *Сааков Э. С.* Регулирование процесса ввода в эксплуатацию энергоблоков АЭС. – Электрические станции, 2007, № 10.