

чительному увеличению неопределенности в центре активной зоны. В местах расположения органа регулирования наблюдается локальное увеличение относительного среднеквадратичного отклонения плотности потока тепловых нейтронов.

Численные расчеты показывают, что характеристики системы регулирования оказывают значительное влияние на неопределенность нейтронного поля. В заключение отметим, что спектр собственных значений не зависит от возмущения параметров реакторной модели или характеристик системы регулирования. Поэтому формулы (9), (10) удобны для проведения многовариантных расчетов ковариации нейтронного поля при различных корреляционных зависи-

мостях параметров модели и расположении детекторов и органов регулирования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Gandini A.** First and higher order, heuristically based generalized perturbation theory (HGPT) with optional control reset variable. — *Ann. Nucl. Energy*, 1996, v. 23, № 8, p. 681—693.
2. **Gandini A.** Implicit and explicit higher order. Perturbation methods for nuclear reactor analysis. — *Nucl. Sci. Engng*, 1978, v. 67, № 3, p. 347—355.
3. **Горюнов В.К.** Пространственные флуктуации распределения нейтронов и мощности в критическом реакторе. — *Атомная энергия*, 1979, т. 46, вып. 4, с. 227—232.

Поступила в Редакцию 23.06.15

УДК 699/841+621.039

МЕТОДОЛОГИЯ ОЦЕНКИ ЗАПАСА СЕЙСМОСТОЙКОСТИ ЗДАНИЙ, СООРУЖЕНИЙ И ОБОРУДОВАНИЯ АЭС

*Сааков Э.С., Рясный С.И., Казновский П.С., Касьянов К.Г., Зайкин И.И.
(АО «Атомтехэнерго», г. Мытищи, Московская обл.)*

Оценка сейсмической безопасности эксплуатируемого энергоблока АЭС отличается от оценки и аттестации сейсмостойких конструкций, систем и элементов энергоблока, выполняемых на этапе проектирования, тем, что выполняется в его реальном состоянии [1, 2]. В этом состоянии реакция и предельная сейсмическая нагрузка на энергоблок АЭС будут зависеть от условий монтажа и строительства, последствий эксплуатации и ремонтов, а также эффектов старения.

В отечественной практике сейсмическая безопасность энергоблока АЭС обосновывается на расчетно-экспериментальной оценке сейсмической безопасности конструкций, систем и элементов, заключающейся в непосредственном обследовании каждой единицы оборудования важных для безопасности систем. При этом собственные динамические характеристики определяются экспериментально в натурных условиях, расчеты проводятся по уточненным схемам, соответствующим реальным условиям раскрепления и обвязки оборудования [3].

В зарубежной практике сейсмическая безопасность энергоблока АЭС оценивается с помощью процедур оценки запаса сейсмостойкос-

ти по методологии SMA, которые включают в себя следующие основные этапы [4, 5]:

формирование экспертной группы для выполнения оценки;

разработка детальной программы оценки сейсмической безопасности энергоблока;

определение землетрясения уточненного уровня (сейсмических характеристик площадки — акселерограмм, спектров ответа на грунте);

изучение процедуры безопасного останова энергоблока в случае землетрясения и составление перечня ответственных за безопасный останов конструкций, систем и элементов, которые будут подвергнуты оценке;

сейсмическая оценка зданий и сооружений в их фактическом состоянии;

определение исходных данных для оценки (расчет поэтажных акселерограмм и спектров ответа зданий и сооружений на заданное сейсмическое исходное воздействие);

обследование оборудования и исключение из рассмотрения конструкций, систем и элементов, сейсмостойкость которых подтверждена накопленными ранее данными;

вычисление пикового сейсмического ускорения на грунте, при котором высока достовер-

ность низкой вероятности отказа для выбранных конструкций, систем и элементов (в англоязычных документах этот параметр обозначается HCLPF);

выявление конструкций, систем и элементов, не удовлетворяющих критериям сейсмостойкости;

повышение сейсмостойкости несейсмостойких конструкций, систем и элементов, включая дополнительные расчеты и/или испытания;

расчет пикового сейсмического ускорения на грунте, при котором высока достоверность низкой вероятности отказа для энергоблока.

Применение этой методологии мотивировано стремлением снизить затраты и не предусматривает расчетно-экспериментальную оценку сейсмической безопасности конструкций, систем и элементов в натурных условиях вследствие сравнительно высокой трудоемкости и стоимости непосредственного поэлементного обследования (экспериментальное определение собственных динамических характеристик + расчет на прочность). Методология опирается на базу данных сейсмической аттестации оборудования, на основании которой из дальнейшего рассмотрения исключаются заведомо сейсмостойкие конструкции, системы и элементы. Однако исключение расчетно-экспериментальной оценки в натурных условиях приводит к снижению достоверности и надежности, связанному с недостаточной методической обоснованностью использования зарубежных баз данных сейсмической аттестации оборудования, особенно в отечественных условиях, поскольку эти базы недоступны [6].

Тем не менее мировой опыт сейсмической квалификации энергоблоков АЭС по методологии SMA необходимо учитывать и использовать в целях поиска, определения и реализации возможностей снижения объема и стоимости работ при сохранении требуемого уровня достоверности и надежности оценки. В настоящей работе рассмотрены содержание и использование методологии оценки запаса сейсмостойкости, модифицированной для практического применения на АЭС отечественных проектов.

В отличие от исходной SMA представленная методология не предполагает отказ от расчетно-экспериментальной оценки сейсмической безопасности конструкций, систем и элементов в натурных условиях, однако в ней предусмот-

рены возможности обоснованного сокращения объема работ, в том числе исключение расчетно-экспериментальной оценки при условии достаточного обоснования другими менее трудоемкими процедурами, включенными в методологию.

ОСНОВНЫЕ УСЛОВИЯ ОЦЕНКИ СЕЙСМИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

Требования к оценке сейсмической безопасности определяются следующими условиями.

Функции безопасности энергоблока АЭС должны обеспечиваться при возможном воздействии на него землетрясения с параметрами, соответствующими землетрясению уточненного уровня. Согласно методологии SMA для приведения ядерной установки из нормальных условий эксплуатации к состоянию безопасного останова должны быть обеспечены основные функции безопасности:

поддержание активной зоны в подкритическом состоянии;

отвод тепла из активной зоны;

локализация радиоактивных материалов, контроль эксплуатационных сбросов, ограничение аварийных выбросов.

Варианты безопасного останова реакторной установки могут быть определены в проектной документации АЭС, руководствах по управлению запроектными авариями или в программе оценки сейсмической безопасности. Оценке подлежат только те конструкции, системы и элементы, которые требуются для приведения ядерной установки из нормальных условий эксплуатации к состоянию безопасного останова.

Следует определить исходные условия во время и после землетрясения, например, потерю электропитания энергоблока от внешнего источника и отсутствие нормального питания на площадке, такого, как питание от другого энергоблока АЭС или традиционной электростанции на площадке, при условии, что они будут подвергнуты общему воздействию землетрясения. Если доказано, что параметр HCLPF электростанции, линии передач и подстанции равен или лучше соответствующих характеристик оцениваемого блока АЭС, то можно рассчитывать на наличие нормального энергоснабжения.

При выборе перечня оборудования безопасного останова следует ограничиться следующими условиями:

внешний источник электроэнергии может быть недоступным до 72 ч после землетрясения;

нет других экстраординарных событий или аварий, таких, как потеря теплоносителя, разрыв первого контура, взрывы, пожары, экстремальные ветры и др., кроме землетрясения уточненного уровня и потери внешнего электроснабжения;

предусмотрен альтернативный метод безопасного останова с использованием иного варианта безопасного останова или иной единицы оборудования в том же варианте, если достижение и поддержание безопасного останова зависит от отдельной единицы оборудования, отказ которого как вследствие сейсмических нагрузок, так и случайного отказа мог бы препятствовать выполнению любой основной функции безопасности.

Требования к системам во время землетрясения определяются в целях минимизации последствий землетрясения, таких, как потеря нормального питания от внешнего источника и аварии с малой потерей теплоносителя внутри защитной оболочки. Альтернативой оценке всех трубопроводных систем малого диаметра внутри защитной оболочки является подтверждение того, что один из вариантов безопасного останова ослабляет аварию с малой потерей теплоносителя. Кроме того, должны быть рассмотрены резервные варианты безопасного останова, включая допущения относительно готовности систем и элементов.

ПРОЦЕДУРЫ ОЦЕНКИ ЗАПАСА СЕЙСМОСТОЙКОСТИ

Формирование экспертной группы для выполнения оценки. Экспертная группа должна включать специалистов по системному анализу, эксплуатационный персонал и имеющих опыт специалистов по сейсмической безопасности. Специалисты по системному анализу основное внимание уделяют определению основных и вспомогательных систем, необходимых для достижения конечного состояния останова энергоблока на основании перечисленных предположений и допущений. Они совместно с эксплуатационным персоналом формулируют аль-

тернативные варианты безопасного останова, выбирают окончательный предпочтительный способ безопасного останова и, если требуется, альтернативный с помощью специалистов по сейсмической безопасности. Последние обосновывают исключение из дальнейшего рассмотрения выбранные конструкции, системы и элементы с точки зрения прочности и внутрискансионной уязвимости, рассчитывают пиковое сейсмическое ускорение на грунте, при котором высока достоверность низкой вероятности отказа конструкций, систем и элементов, необходимых для безопасного останова.

Разработка программы оценки запаса сейсмостойкости энергоблока АЭС. В программе должны быть отражены цель и условия проведения работ (готовность и исходное состояние энергоблока и систем, аппаратура), ответственность персонала, мероприятия, обеспечивающие безопасное проведение работ, перечень измеряемых и контролируемых параметров, порядок и последовательность операций по этапам выполнения, критерии завершения работ, приемочные критерии, метод обработки результатов обследований, формы представления данных и результатов, перечень конструкций, систем и элементов, подлежащих оценке.

Выбор землетрясения уточненного уровня. По терминологии МАГАТЭ землетрясение уточненного уровня (RLE) есть совокупность характеристик землетрясения, которое обследуется по методологии SMA. Оно может быть назначено непосредственно регулирующим органом или эксплуатирующей организацией в виде максимального уровня колебаний грунта. В этом случае дополнительно сейсмическая опасность не оценивается, уточненный уровень землетрясения должен быть равен или превышать максимальное расчетное землетрясение с периодом повторяемости 10^{-4} год⁻¹, определенное в соответствии с нормативной документацией и принятое в проекте. Спектр ответа на грунте должен быть установлен таким, чтобы вероятность того, что он не будет превышен, составила 84%.

Определение перечня конструкций, систем и элементов для безопасного останова. В перечень для сейсмической оценки должны быть включены:

механическое и электротехническое оборудование, используемое для поддержания безопасного останова;

оборудование в системах, поддерживающих эксплуатацию оборудования безопасного останова, т.е. источники питания, системы управления, охлаждения, смазки;

системы контроля и управления, требуемые для работы оборудования безопасного останова и подтверждения того, что функции безопасного останова достигнуты и поддерживаются;

резервуары и теплообменники;

кабели и кабельные каналы, поддерживающие электрические кабели для выбранного оборудования безопасного останова;

здания и сооружения, в которых расположено оборудование, включенное в данный перечень;

гидротехнические сооружения и элементы, повреждение которых из-за сейсмического воздействия может привести к затоплению площадки АС или нарушению в работе систем отвода тепла;

другие элементы, повреждение которых может в условиях сейсмического воздействия привести к пространственному взаимодействию с другими элементами, другими конструкциями, системами и элементами.

Сбор исходных данных для оценки запаса сейсмостойкости. В исходные данные должны быть включены вся общая и специальная документация, использованная на этапах проектирования и сооружения, документация по реконструкции и модернизации энергоблока, в том числе техническое обоснование безопасности, предпочтительнее окончательный отчет, проектные нормы надежности конструкций, систем и элементов, чертежи общего вида и компоновочные чертежи для конструкций, оборудования и распределительных систем, например, трубопроводов, кабельных, вентиляционных каналов, результаты вероятностного анализа безопасности внутренних и внешних событий, если он выполнялся, результаты предэксплуатационных испытаний и расчетов на сейсмическое воздействие конструкций, систем и элементов, отчеты о несоответствиях и корректирующих действиях.

Необходимо рассмотреть все записи и документацию за период эксплуатации энергоблока, которые касаются надежности конструкций,

систем и элементов с точки зрения случайных отказов и эффектов старения, выявленных в результате инспекций, включая документы о ремонтных работах, и оценок остаточного ресурса, отчеты об определении динамических характеристик конструкций, систем и элементов.

Необходимо получить данные о статических и динамических свойствах грунта и скальных пород. Если такие данные были получены на более раннем этапе, например, при проектировании, их следует рассмотреть с точки зрения достаточности. Необходимо проанализировать взаимодействие грунт—основание по проводившимся ранее исследованиям, а также собрать информацию о методах анализа отклика строительных конструкций при проектировании энергоблока, включая расчет поэтажных спектров ответа.

Проведение обходов. После сбора исходных данных необходимо оценить состояние и фактические условия энергоблока. С этой целью провести обход строительных конструкций, систем и оборудования.

В предварительный обход по оценке сейсмической безопасности необходимо включать визуальный осмотр бетонных зданий для выявления трещин, явлений эрозии/коррозии и поверхностных повреждений, степени цементации/карбонизации, определения толщины защитного слоя бетона и степени деградации подземной части фундамента. Должно быть выполнено выборочное обследование элементов конструкций для проверки геометрических характеристик — определение наличия дефектов и повреждений конструкций: прогибов, отклонений от вертикали.

Целью предварительного обхода систем и оборудования является рассмотрение способа безопасного останова. Его рекомендуется выполнять для подтверждения имеющейся в проекте блока АЭС и получения дополнительной информации о точном расположении элемента на площадке (здания, помещения, высотной отметке, ориентации в осях здания), соответствии требованиям конструкторской документации в части достаточности условий закрепления при монтаже и эксплуатации, состоянии фиксирующих конструкций, примыкающих элементов распределительных систем (трубопроводов, кабелей, воздухопроводов), возможном сейсмическом пространственном взаимодействии элемента с

близко расположенным оборудованием и строительными конструкциями.

Конечным результатом является выбор окончательного(ых) пути(ей) безопасного останова и корректировка исходного перечня подлежащих оценке конструкций, систем и элементов.

При детальном обходе оцениваются конструкции, системы и элементы, устойчивость которых не проверялась во время предварительного обхода, а также подлежащие оценке пикового сейсмического ускорения на грунте, при котором высока достоверность низкой вероятности отказа.

Визуальный осмотр систем и оборудования включает оценку состояния и соответствия проекту опорных конструкций и крепления оборудования к строительным или промежуточным опорным конструкциям, состава элементов крепления, их расположения, затяжки болтов, оценку состояния опорных элементов трубопроводов с проверкой соответствия проекту состава и основных характеристик опор, затяжки элементов крепления в хомутах, состояния прочих элементов крепления, оценку соответствия проекту основных габаритных размеров участков трубопроводов, определение и оценку пространственного взаимодействия, которое может оказывать неблагоприятное воздействие на работоспособность выбранных конструкций, систем и элементов при сейсмическом воздействии вследствие падения, близости, разбрызгивания и затопления.

После завершения обходов оценивается запас сейсмостойкости.

Основные подходы к оценке запаса сейсмостойкости. Для каждого здания и строительной конструкции, подлежащих оценке, следует определить функцию, которая должна быть сохранена во время и после землетрясения, причину возможного отказа, приводящую к нарушению функции. На основе испытаний необходимо проверить фактические марки бетона, использованные при строительстве важных для безопасности конструкций. При дальнейшем анализе и оценке характеристик следует использовать собранные данные вместо первоначальных проектных. Если имеются несоответствия, следует изучить причины и дать оценку последствиям этих несоответствий. При оценке следует использовать фактические свойства

материалов стальной арматуры. Сведения о свойствах материалов можно получить из данных испытаний. При отсутствии их следует получить надежными методами разрушающего и неразрушающего контроля. В анализ стальной арматуры включаются как механические свойства, так и детализация, например, размер арматурных стержней, расположение, геометрические характеристики, защитный слой бетона, расстояние между арматурными стержнями. Для оценки основных характеристик всей конструкции следует оценить свойства всех важных элементов, принимающих нагрузку.

Поверочные расчеты наиболее нагруженных и поврежденных несущих элементов должны выполняться с учетом их фактического состояния.

Математические модели и расчетные схемы для оценки сейсмостойкости верифицируются экспериментальным определением динамических характеристик зданий, сооружений и строительных конструкций АЭС. В качестве возбудителей колебаний используются техногенные микросейсмы, ветровые нагрузки и специальные вибраторы.

Поэтажные акселерограммы и спектры ответа систем и оборудования должны быть получены на основе динамической реакции конструкции на сейсмические воздействия, заданные синтезированными трехкомпонентными акселерограммами для оцениваемого уровня землетрясения. Параметры воздействий на данном уровне (форма спектра, длительность акселерограммы и др.) принимаются соответствующими параметрам воздействий, определенным для максимального расчетного землетрясения, за исключением общего уровня ускорения, в том числе спектрального.

Оценка собственных динамических характеристик (собственных частот, форм и декрементов колебаний), влияющих на сейсмостойкость систем и оборудования, основывается на натурных динамических испытаниях и/или расчетном анализе.

Следует оценить вероятность совпадения несейсмических нагрузок с землетрясением для принятия решения относительно того, следует ли их учитывать. При этом возможны следующие правила оценки: динамические нагрузки всегда комбинируются с нагрузками от землетрясения уточненного уровня (высокая вероят-

ность их одновременного влияния), динамические нагрузки комбинируются с нагрузками от землетрясения уточненного уровня при условии, что они вызваны землетрясением и есть высокая вероятность их совпадения (больше 50%). Длительность такого землетрясения консервативно считается равной 20 с (см. таблицу).

Комбинации сейсмических нагрузок и коэффициенты нагрузок

Сооружение, оборудование	Комбинация и коэффициент нагрузки*
Элементы оборудования	$1 M + 1 L + 1 P + 1 RLE$
Патрубки элементов оборудования	$1 M + 1 L + 1 T + 1 P + 1 RLE$
Опоры элементов оборудования и их анкеровка	$1 M + 1 L + 1 T + 1 RLE$
Трубопроводы	$1 M + 1 L + 1 P + 1 RLE$
Опоры трубопровода и их анкеровка	$1 M + 1 L + 1 T + 1 RLE$
Сооружения, поддерживающие кабель, технологические поддерживающие платформы и др.	$1 M + 1 L + 1 T + 1 RLE$
Строительные несущие сооружения	$1 M + 1 L + 1 RLE$

* M — собственная масса; L — динамическая нагрузка при нормальных условиях эксплуатации или та часть общей динамической нагрузки, которая может возникнуть при нормальных условиях эксплуатации; T — нагрузка в результате ограниченных температурных смещений при нормальных условиях эксплуатации, если таковые имеются; P — внутреннее давление при нормальных условиях эксплуатации, если таковое имеется; RLE — нагрузки, обусловленные действием землетрясения уточненного уровня.

Отметим, что нормальные условия эксплуатации элементов оборудования могут отличаться от нормальных условий эксплуатации станции. Например, для ряда единиц оборудования некоторых трубопроводов АЭС с типом реактора ВВЭР они могут быть аварийными условиями станции, во время которых это оборудование или трубопроводы должны быть сейсмостойкими.

Волновые эффекты от землетрясения рассматриваются в анализе всех заглубленных трубопроводов и каналов, а также при сопоставимой длине наземных сооружений с самой короткой длиной сейсмической волны.

Одновременно с нагрузками от землетрясения могут возникать динамические нагрузки, которые обусловлены нормальной эксплуатационной вибрацией, ударами оборудования, пульсацией давления, вызываемой клапанами, насосами и др. (особенно опасны для опор) — такие нагрузки должны определяться на основе гидродинамического анализа систем трубопроводов, нарушением нормальной работы или аварийной работой некоторых элементов. С практической точки зрения удары и пульсации давления являются наиболее опасными нагрузками для опор трубопровода и патрубков оборудования.

Оценка запаса сейсмостойкости выбранных для оценки конструкций, систем и элементов. В зарубежных процедурах методологии SMA при оценке сейсмостойкости исключаются из рассмотрения конструкции, системы и элементы, сейсмостойкость которых подтверждена накопленными ранее данными. Пиковое сейсмическое ускорение на грунте, при котором высока достоверность низкой вероятности отказа, оценивается путем сопоставления граничных спектров сейсмического сопротивления со спектрами, характеризующими воздействие на конструкции, системы и элементы. Поскольку таблицы с критериями исключения и граничные спектры для SMA разработаны на основе недоступной американской базы данных, не имеющей ни одного примера оборудования отечественных АЭС, возможность верификации спектров и таблиц исключается [7, 8]. В настоящее время ведется работа над созданием отечественной базы данных, обеспечивающей возможность применения технологии и процедур SMA [9].

Процедура установления соответствия обследуемого оборудования имеющемуся в базе данных должна включать следующее сравнение: наиболее вероятные типы неисправностей, основанные на прогнозируемом поведении критических элементов, собственные частоты и формы колебаний, характеристики затухания (декременты) колебаний, размер оборудования, масса и положение (вертикальное, горизонтальное, наклонное), технология и качество изготовления, срок эксплуатации и факторы старения, расположение центра тяжести, наличие и размещение консольных/свободнонесущих деталей/частей, исполнение и параметры тяжелых и/или движущихся внутренних частей, опоры и

раскрепление, присоединенные линии, основания и др., наличие устройств (механических или электрических), чувствительных к вибрациям и ударам. В результате могут быть определены и применяться обобщенные граничные спектры предельно допустимого сейсмического ускорения для различных классов и типов оборудования в целях сопоставления со спектрами сейсмического ускорения на конкретном энергоблоке. Также могут быть составлены и применяться разработанные таблицы исключения из дальнейшего рассмотрения некоторых типов оборудования с гарантированным запасом сейсмостойкости. Однако прежде чем таблицы исключения и граничные спектры могут быть использованы, должны быть доказаны их обоснованность и применимость.

Особо следует отметить, что сейсмостойкость конструкций, систем и элементов отечественных АЭС до создания базы данных и разработки на ее основе критериев исключения и граничных спектров может оцениваться только расчетно-экспериментальным методом [3, 6, 8].

Пиковое сейсмическое ускорение на грунте, при котором высока достоверность низкой вероятности отказа для выбранных конструкций, систем и элементов, определяется с использованием факторов сейсмической безопасности. В предположении упругих деформаций сооружения или оборудования применяется фактор $(FS)_E$, упругопластического механизма деформирования — $(FS)_I$ [5]:

$$(FS)_E = \frac{C - D_{NS}}{D_S + \Delta C_S}; \quad (FS)_I = (FS)_E F_\mu;$$

$$HCLPF = (FS)_I PGA_{RLE},$$

где C — стойкость (несущая способность) сооружения или оборудования (общая стойкость не только к предельной нагрузке, но и к другим ограничивающим факторам, таким, как сейсмическая амплитуда, ускорение, общее смещение и др.); D_S — сейсмическая нагрузка на сооружение или оборудование; D_{NS} — сочетание всех несейсмических нагрузок. Параметры D_{NS} , D_S могут быть выражены в заданном месте и в заданном направлении в форме внешнего воздействия, внутренних усилий, смещения, ускорения или другого параметра, определяющего поведение сооружения или оборудования под влиянием заданной нагрузки (в случае много-

компонентного воздействия, внутренних усилий, смещений или ускорений такой параметр может быть, например, немного уменьшен или быть результирующей величиной); ΔC_S — снижение стойкости, обусловленное сейсмическими нагрузками; F_μ — коэффициент неупругого накопления энергии; PGA_{RLE} — пиковое ускорение грунта, соответствующее землетрясению уточненного уровня.

Оборудование квалифицируется как сейсмостойкое при следующих условиях:

пиковое сейсмическое ускорение на грунте, при котором высока достоверность низкой вероятности отказа, выше пикового ускорения грунта, соответствующего землетрясению уточненного уровня;

функциональность при сейсмических воздействиях требуемого уровня (или выше требуемого) оборудования, чувствительного к ударам и колебаниям, верифицирована испытаниями в соответствии с нормативной документацией;

возможное взаимодействие с ближайшим оборудованием или конструкциями не влияет на выполнение функции безопасности.

По результатам оценки выявляются несейсмостойкие конструкции, системы и элементы и с учетом технико-экономических оценок принимается решение о выборе варианта повышения сейсмостойкости: разработка и внедрение компенсирующих мероприятий, например, дополнительное усиление опорных конструкций, дополнительное раскрепление, установка демпферов, ограничителей перемещений и др., замена оборудования на новое (модернизированное), проведение дополнительных расчетов и/или испытаний.

Запас сейсмостойкости оценивается при продлении срока эксплуатации АЭС, пересмотре, повышении безопасности, вероятностном анализе безопасности, разработке условий эксплуатации, инструкций на случай аварии, установлении технических требований к оборудованию, модернизации и реконструкции.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Оценка сейсмической безопасности существующих ядерных установок. Руководство № NS-G-2.13. Сер. норм МАГАТЭ по безопасности. Вена: МАГАТЭ, 2014.

2. **Seismic** Evaluation of Existing Nuclear Power Plant. Safety Rep. Ser. № 28. Vienna: IAEA, 2003.
3. **Казновский П.С., Казновский А.П., Сааков Э.С., Рясный С.И.** Подтверждение сейсмостойкости оборудования АЭС после монтажа. — Электрические станции, 2012, № 12, с. 2—6.
4. **A Methodology** for Assessment of Nuclear Power Plant Seismic Margin (Revision 1). EPRI NP-6041-SL, Project 2722-23, Final Report, 1991.
5. **Generic** Implementation Procedure (GIP) for Seismic Verification of Nuclear Power Plant Equipment, Rev. 3A. Washington, 2001.
6. **Сааков Э.С., Рясный С.И., Казновский П.С. и др.** Сравнительный анализ зарубежных и российских методологий оценки сейсмостойкости оборудования АЭС. — Атомная энергия, 2013, т. 115, вып. 6, с. 309—317.
7. **Earthquake** Experience and Seismic Qualification by Indirect Methods in Nuclear Installations. TECDOC 1333. Vienna: IAEA, 2003.
8. **Ананьев А.Н., Казновский П.С., Казновский С.П. и др.** Сейсмическая безопасность атомных станций. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011. 234 с.
9. **Сааков Э.С., Рясный С.И., Зайкин И.И. и др.** Повышение эффективности расчетно-экспериментальной оценки сейсмостойкости оборудования АЭС с применением базы данных. — Атомная энергия, 2015, т. 118, вып. 3, с. 137—141.

Поступила в Редакцию 20.10.15

УДК 621.65+621.311.25+621.039

ПРИМЕНЕНИЕ ЧАСТОТНОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ГЦН ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ НОМИНАЛЬНОЙ МОЩНОСТИ ВВЭР

Хрусталева В.А., Башлыков Д.О. (СГТУ им. Ю.А. Гагарина, г. Саратов)

Достигнутая в настоящее время мощность ВВЭР-1000 104—106% номинальной может быть повышена за счет высоковольтного частотно-регулируемого привода главных циркуляционных насосов. Развитие высоковольтной полупроводниковой электроники позволило создать к началу 2000-х годов надежные преобразователи частоты высокого напряжения большой мощности с форсированным охлаждением, на базе которых могут быть выполнены высоковольтные частотно-регулируемые приводы ГЦН [1]. Преимущества регулируемого привода в режимах неполной нагрузки заключаются в сниженном потреблении электроэнергии на собственные нужды АЭС и лучших температурных условиях для корпуса и внутрикорпусного оборудования из-за стабилизации температурных полей [2]. Высокая маневренность энергоблоков АЭС в энергосистемах с их высокой долей становится необходимой при противоаварийном регулировании резких колебаний частоты быстрым набросом и сбросом нагрузки, например, от 2 до –8% $N_{ном}$. С переходом к переменному расходу теплоносителя в первом контуре с частотным регулированием ГЦН целесообразно всегда, в том числе в дни несения нагрузок выше $N_{ном}$ оставлять запас по мощности на 2—4% в сторону ее повышения [1—3]. Запас по мощности должен быстро реализовываться с минимальной инерцией. Это обеспечивается динамическим открытием стопорно-

регулирующих клапанов, исходя из расчета прироста расхода теплоносителя, пара в голову турбины и давления перед ней. Потребуется переход к плавающей уставке по давлению пара после первой ступени, изменение формирования многоимпульсных управляемых сигналов и решение других вопросов автоматики [4, 5].

В процессе анализа программы регулирования с изменяющимся расходом теплоносителя G_x учитываются балансовые соотношения повышенного расхода теплоносителя, питательной воды $D_{п.в.}$, а также их энтальпии. Повышенное давление свежего пара перед первой ступенью, требуемое для бездрессельного пропуска в голову турбины, может быть определено из решения системы балансовых уравнений.

Система уравнений может быть представлена единым обобщающим балансом теплоты, передаваемой от теплоносителя к котловой воде, для получения в парогенераторе рабочего тела (пара) с требуемым расходом для задаваемого уровня мощности. При этом давление свежего пара должно соответствовать условию бездрессельного пропуска через паровпуск. Очевидно, по системе уравнений можно найти расход только в неявном виде:

$$\begin{cases} K_n F \frac{t_2 - t_{1x}}{\ln(t_2 - t_3)/(t_{1x} - t_3)} = G_x [h_2 f(t_2) - h_1 f(t_{1x})]; \\ Q_p = D_{п.в.} f(p_s) [h_{0s} - h_{п.в.} f(p_s)], \end{cases}$$