

## НЕКОТОРЫЕ ИТОГИ ОБЕСПЕЧЕНИЯ СЕЙСМОСТОЙКОСТИ АЭС В РОССИИ

И.В. Калиберда, Е.Г. Бугаев, В.Г. Бедняков, И.М. Лавров, Л.М. Фихиева (НТЦ ЯРБ Госатомнадзора России), Ф.Ф. Аптикаев, А.В. Николаев (Институт физики Земли РАН), С.П. Казновский (ВНИИАМ), В.В. Пискарев, А.Н. Тяпин (ФГУП "Атомэнергoproject")

В статье описываются основные подходы к выполнению работ по обеспечению сейсмостойкости АЭС России. В решении проблемы обеспечения сейсмостойкости АЭС участвуют различные ведомства и их организации (Минатом России, Госатомнадзор России, МЧС России, Госстрой России, РАН, Минэнерго России, Минтяжмаш России, Минобороны России и др.).

### 1. Нормативное регулирование

Решение проблемы обеспечения сейсмостойкости атомных станций можно рассматривать в разрезе четырех выделенных авторами периодов:

- ранний (70-е годы, АЭС с ВВЭР-440);
- эволюционный (80-е годы, АЭС с ВВЭР-440 и ВВЭР-1000);
- интенсивный (послечернобыльский, 80-е – 90-е годы, АЭС с ВВЭР-440, ВВЭР-1000, РБМК-1000 и атомные станции теплоснабжения);
- современный (пересмотр сейсмичности площадок и сейсмостойкости объектов, повышение сейсмостойкости на базе новых знаний, достижений науки и техники и нормативного регулирования, лицензирование деятельности в области использования атомной энергии).

Современный период решения указанной проблемы характеризуется дифференцированным подходом к анализу и обеспечению сейсмостойкости:

- действующих АЭС с учетом их старения, отказов и повреждаемости оборудования и трубопроводов, в том числе в контексте продления срока эксплуатации станций путем проведения компенсирующих мероприятий;
- вновь размещаемых и сооружаемых АЭС в соответствии с нормативными требованиями нормативных документов.

Первые атомные станции проектировались по нормативным документам, предназначенным для объектов гражданского и промышленного назначения. Впервые анализировалась сейсмостойкость сооружений, оборудования и трубопроводов главного циркуляционного контура АЭС в Армении (1975 – 1978 гг.).

В 1978 г. были разработаны и введены в действие Временные нормы проектирования сейсмостойких атомных станций (ВСН-15-78). При их составлении учтен опыт МАГАТЭ, а также нормативные документы США, Японии, Франции, Румынии. Введены два уровня расчетных землетрясений, категории сейсмостойкости, специфические требования сейсмостойкости к зданиям, сооружениям, системам и элементам в зависимости от их принадлежности к категориям сейсмостойкости.

При пересмотре нормативного документа "Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок.

ПНАЭ Г-7-002-87" в 1986 г. в него введен новый раздел, посвященный сейсмическому анализу оборудования и трубопроводов АЭС.

Введенные в действие в 1987 г. Нормы проектирования сейсмостойких атомных станций. ПНАЭ Г-05-006-87 взамен ВСН-15-78 практически сохранили все принципы и подходы ВСН-15-78. В 1987 г. разработан и введен в действие документ "Требования к размещению атомных станций", которым предписываются исследования сейсмичности площадок при выборе районов и пунктов для размещения АЭС.

Согласно введенному в действие в 1990 г. нормативному документу "Общие положения обеспечения безопасности атомных станций (ОПБ-88)" системы и элементы, важные для безопасности, должны быть способны в соответствии со специальными нормами и правилами выполнить свои функции в установленном проектом объеме с учетом землетрясений.

Новое развитие проблема обеспечения сейсмостойкости получила в последнее десятилетие XX века после сильного землетрясения, произошедшего в Армении.

В 1993 г. разработан и введен в действие нормативный документ "Размещение атомных станций. Основные критерии и требования по обеспечению безопасности. ПНАЭ Г-03-33-93". В 1995 г. введенный в действие нормативный документ "Учет внешних воздействий природного и техногенного происхождения на ядерно- и радиационно опасные объекты. ПНАЭ Г-05-035-94" содержит требования к обеспечению сейсмостойкости. Действуют пересмотренные федеральные нормы и правила "Нормы проектирования сейсмостойких атомных станций. НП-031-01". Они устанавливают требования к обеспечению безопасности наземных атомных станций с реакторами всех типов при сейсмических воздействиях, определению категорий сейсмостойкости элементов атомных станций с учетом их класса безопасности, назначению параметров стандартных сейсмических воздействий, обеспечению сейсмостойкости строительных конструкций и оснований сооружений атомных станций, технологического, электро-технического оборудования, средств автоматизации и связи. Кроме того, в них содержатся рекомендации по составу и объему исследований для уточнения сейсмических и тектонических условий размещения атомной станции и определения параметров внешних воздействий, для оценки эффективности проектных решений сейсмостойкости унифицированного проекта для обеспечения выдачи энергии и тепла, а также ядерной и радиационной безопасности применительно к конкретным условиям размещения.

Значительное развитие получила и нормативно-методическая база. Так, руководство по безопасности "Определение исходных сейсмиче-

ских колебаний грунта для проектных основ. РБ-006-98", разработанное в 1998 г., содержит: методы и подходы определения параметров сейсмических колебаний грунта для проектных основ; рекомендации по определению параметров акселерограмм, связанных с макросейсмическими характеристиками площадки; критерии синтезирования сейсмограмм; рекомендации по определению расчетных сейсмических колебаний грунта для отметки коренной породы; рекомендации по определению характеристик параметров сейсмических колебаний грунта заданной вероятности превышения.

Исходные сейсмические колебания грунта определяются с целью получения исходных данных для использования в анализах сейсмостойкости зданий, сооружений, систем и элементов АЭС. Они также необходимы при оценке рисков от влияния неопределенностей исходной сейсмологической информации на прогноз безопасности атомных станций.

В 2001 г. разработано и введено в действие руководство по безопасности "Оценка сейсмической опасности участков размещения ядерно- и радиационно опасных объектов на основании геодинамических данных. РБ-019-01". В нем рассмотрены методы выделения и оценки опасности локальных зон возможных очагов землетрясений (ВОЗ) и оценки максимальных магнитуд  $M_{max}$  землетрясений в пределах платформенной территории; установлены критерии выделения локальных зон и оценки  $M_{max}$  по геодинамическим данным в условиях дефицита сейсмологической информации; определен состав исследований по изучению геодинамических зон и обоснованию размещения АЭС в пределах целикового блока земной коры, не нарушенного активными разломами.

Использование геодинамической информации на основании дистанционных исследований (дешифрирования космических снимков) и морфоструктурного анализа особенно актуально, поскольку она может быть получена в сроки инженерных изысканий и исследований.

Процесс выбора и оценки сейсмических и тектонических условий площадки атомной станции согласно международной и отечественной практике должен охватывать весь жизненный цикл: обоснование инвестиций на строительство, технико-экономическое обоснование (проект), рабочий проект, строительство, эксплуатацию и вывод из эксплуатации.

Разработан ряд руководств по экспертизе, а также методика оценок сейсмо- и взрывобезопасности АЭС. Практически за последние годы (пять-семь лет) создана методическая база обеспечения сейсмостойкости.

## 2. Сейсмическое районирование в России

Одной из наиболее важных задач надежного проектирования и изготовления конструкций и оборудования в сейсмостойком исполнении остается проблема определения сейсмических воздействий. Для этого используются карты, содержащие сведения о сейсмическом районировании. На них указываются места возможных максимальной

силы землетрясений в баллах той или иной сейсмической шкалы, а также баллы сейсмической опасности.

Оценка сейсмической опасности некоторой территории – это оценка параметров распределения вероятности сейсмических воздействий по их силе в пространстве и времени, а их отображение на карте обеспечивает понимание сейсмического районирования.

По традиции оценки сейсмической опасности в России – это результат проведения трех видов сейсмического районирования, различающихся задачами и объектами исследования:

- общего сейсмического районирования (ОСР). ОСР служит для планирования развития народного хозяйства в масштабах страны и крупных регионов. Масштаб картирования 1:2 500 000;
- детального сейсмического районирования (ДСР). Цель ДСР – выявление и оценка характеристик сейсмогенерирующих зон, сейсмические события в которых представляют опасность для конкретных объектов. При ДСР, как и при ОСР, изучаются источники сейсмической опасности – зоны ВОЗ, а также условия генерации и распространения сейсмических колебаний;
- сейсмического микрорайонирования (СМР). СМР площадки предназначается для уточнения проектного землетрясения и максимально расчетного землетрясения (МРЗ) и определения параметров сейсмических воздействий.

Проблема создания полноценных карт сейсмического районирования актуальна для всех российских регионов. Даже на относительно спокойных в геодинамическом отношении равнинных территориях (территория восточно-европейской платформы) происходили в прошлом и возможны в будущем достаточно сильные (6–7-балльные) и более крупные землетрясения. Цель сейсмического районирования – картирование сейсмической опасности для использования этой информации в инженерных решениях.

История сейсмического районирования территории России начинается с первой нормативной карты, составленной Г.П. Горшковым в 1937 г. В дальнейшем каждые 10–25 лет по мере накопления дополнительной информации о землетрясениях и усовершенствования сейсмологических знаний нормативные карты целиком обновлялись. Последние изменения сделаны в 1978 г. (СР-78).

Новая карта сейсмического районирования территории России (ОСР-97) выпущена в 1997 г. Выполненная на принципиально новой основе (в электронном виде в масштабе 1:2 500 000 и графическом виде – в масштабе 1:8 000 000), она учитывает недостатки предшествующих карт. Этот комплект карт построен так, что обеспечивается прогноз землетрясений и рисков от них с учетом ответственности и важности объектов. Современные карты ОСР, созданные под руководством В.И. Уломова (1999 г.), построены на принципах сейсмической параметризации зон (ВОЗ). В основе их лежат представления о фрактальном структурно-

динамическом единстве геофизической среды и региональной сейсмичности.

Сейсмическую опасность в России принято характеризовать средним периодом повторяемости землетрясений с различной интенсивностью. Комплект карт ОСР-97 предназначен для объектов разной ответственности (массовое строительство жилых, общественных и производственных зданий (сооружений), объекты повышенной ответственности, особо ответственные объекты). Карты комплекта соответствуют периодам повторяемости землетрясений раз в 500, 1000 и 5000 лет. В иной трактовке таким воздействиям отвечают 90 % вероятности неперевышения в течение 50 лет соответственно 10, 5 и 1 %. Кроме трех карт ОСР-97 (А), ОСР-97 (В), ОСР-97 (С), утвержденных в качестве нормативных, специально для атомных объектов разработана карта для периода повторяемости раз в 10 000 лет – ОСР-97 (D).

Историю развития сейсмического районирования в России для обеспечения сейсмостойкости российских АЭС покажем на примере оценки сейсмичности площадки Нововоронежской АЭС.

Блок 4 Нововоронежской АЭС проектировали без учета сейсмичности, так как по карте СР-78 сейсмичность района на уровне ПЗ соответствовала 5 баллам и менее. Однако в соответствии с ПНАЭ Г-05-006-87 надо принимать интенсивность МРЗ больше, чем следовало согласно карте СР-78, на 1 балл (6 баллов); выполнять сейсмологические исследования (включая детальное сейсмическое районирование района и сейсмическое микрорайонирование) площадки для уточнения ПЗ и МРЗ и определения параметров сейсмических воздействий. Последующие изменения карт сейсмического районирования привели к необходимости переоценки сейсмостойкости блока АЭС. Согласно ОСР-97 (D), площадка АЭС расположена в районе сейсмичностью 7 баллов (МРЗ). В то же время установлена возможность превышения сейсмичности в некоторых зонах, определенной по карте ОСР-97 (D), необходимость уточнения геодинамических условий и проведения сейсмического мониторинга, прогноза сейсмического риска, как вероятности появления сейсмических воздействий определенной силы на заданной площади (или в заданном пункте) в течение заданного интервала времени. Учитывается опасность, связанная с землетрясениями малых магнитуд: при малых магнитудах площадь поражения невелика, но значительный ущерб может быть связан с особой важностью или опасностью объекта для населения и окружающей среды.

Для особо важных объектов в радиусе 25 км детальность картирования повышается (масштаб 1:200 000 или 1:300 000).

Поскольку баллы сейсмичности площадок нельзя использовать в инженерных расчетах, перевод оценок из баллов в амплитуды движения грунта производится по шкале сейсмической интенсивности.

Проектный спектр колебаний грунта и типовая сейсмограмма должны соответствовать ожидаемым значениям основных параметров движения грунта. В этом отношении нормы НП-031-01 "Нормы проектирования сейсмостойких атомных станций" выгодно отличаются от более ранних

норм. Так, параметры ожидаемых сейсмических воздействий определяются на основании региональных оценок, полученных при ОСР, ДСР и СМР, с учетом среднемировых данных. В соответствии с этими оценками подбираются реально зарегистрированные акселерограммы или генерируются синтетические (синтезированные) акселерограммы.

### 3. Мониторинг сейсмических явлений и сейсмический мониторинг АЭС

Мониторинг – это непрерывное наблюдение за природными процессами с целью выявления на ранних стадиях развития опасных тенденций. Для мониторинга сейсмических явлений в районе особо важных объектов сети регулярных сейсмических станций недостаточно. Поэтому организуются специальные сети высокочувствительных сейсмических станций. Количество их в сети не менее четырех. Обычно станции устанавливаются при ДСР и продолжают работу после начала функционирования объекта. Поскольку наиболее точно сейсмические воздействия можно прогнозировать на основании данных о сильных колебаниях грунта, станции локальных сетей, кроме высокочувствительной аппаратуры, следует оборудовать приборами для регистрации сильных движений.

Сейсмический мониторинг АЭС осуществляется непрерывным наблюдением сейсмических и сейсмоакустических сигналов с помощью локальной сети сейсмических станций, охватывающих зону до 20 км от АЭС, а также приборов, установленных на самом здании атомной станции.

Основные задачи сети мониторинга следующие.

- Регистрация местных землетрясений, контроль вариаций сейсмической активности, связанных, возможно, с процессами, предвещающими сильные землетрясения (если станция расположена в сейсмоактивной зоне).
- Регистрация слабых и микроземлетрясений, сейсмоакустической эмиссии, их контроль как проявления геодинамических процессов, медленных деформаций верхней части земной коры, подвижек блоков.
- Сейсмоакустическая дефектоскопия – контроль стабильности работы генераторов, неизменности условий их размещения. С этой целью анализируются шумовые и периодические сигналы, излучаемые работающими генераторами и другими установками – источниками вибраций и звука. Целесообразно расположение приборов на станции (на фундаменте, в машинном зале и в других ответственных местах).
- Аварийная сигнализация в случаях аварии на АЭС или сильного землетрясения вблизи нее.

Сеть сейсмического мониторинга состоит из пяти–семи пунктов наблюдения, оснащенных чувствительными короткопериодными трехкомпонентными сейсмографами (1–50 Гц), однокомпонентными сейсмоакустическими датчиками (30–2000 Гц) и наклономерами. Один пункт располагается в фундаменте здания АЭС, остальные – на

расстоянии до 20 км от станции. Кроме того, на самом здании находится 10–20 пунктов регистрации, оснащенных относительно малочувствительными сейсмическими и сейсмоакустическими датчиками (например, на АЭС такая сеть может насчитывать около 50 сейсмографов), контролирующими стабильность работы генераторов и других устройств.

Любая система мониторинга состоит из четырех структурных взаимосвязанных и взаимозависимых блоков. Функции каждого блока системы мониторинга заключаются в следующем.

**Блок 1** состоит из нескольких режимных сетей, обеспечивающих сбор информации о наблюдаемых изменениях параметров во времени.

Основными режимными сетями в системе мониторинга "АЭС – окружающая среда" являются:

1) режимная геодезическая сеть для наблюдения за деформацией конструкций и грунтов основания;

2) гидрогеологическая режимная сеть для наблюдения за уровнем подземных вод, их химическим составом и направлением потока подземных вод;

3) гидрологическая режимная сеть для наблюдения за характером загрязнений источников поверхностных вод (рек, озер, морей и т.д.);

4) сейсмологическая режимная сеть для наблюдения за динамическими нагрузками при землетрясении;

5) радиозоологическая режимная сеть для наблюдения за радиационным фоном в атмосфере, наземной и подземной гидросфере и в почве.

**Блок 2** – это система обработки информации. Полученная из блока 1, она сохраняется, накапливается и обрабатывается соответствующими программными пакетами. Объем данных из блока 1 непрерывно растет, поэтому соответствие критериям оптимизации в зависимости от характера данных и их последующего использования может обеспечить только автоматизированная система. Наиболее приемлемый путь решения вышеуказанных задач – разработка специального банка данных. Этот банк должен готовить для передачи в блок 3 определенную информацию, создающую возможность прогнозирования вероятного поведения отслеживаемой системы в физическом времени.

**Блок 3** содержит пакет программ, обеспечивающих периодическое создание и корректировку математических моделей прогнозирования и описания процессов, происходящих в сфере мониторинга. Пакет программ основан на предварительно разработанных или соответствующим образом откорректированных алгоритмах и должен давать возможность раннего предотвращения чрезвычайных ситуаций.

**Блок 4** предназначен для выдачи рекомендаций нормативного характера по надежной эксплуатации АЭС и ее экологической безопасности.

Эффективность принятых рекомендаций нормативного характера контролируется блоками 1 и 2.

В ходе эксплуатации системы мониторинга необходимо решить следующие задачи:

1) разработка точек сбора информации – режимных сетей, обеспечивающих отслеживание изменения во времени параметров, которые определяют поведение системы "конструкции АЭС – сфера взаимодействия";

2) разработка системы сбора и обработки информации, полученной от режимных сетей мониторинга;

3) разработка блока, выдающего математические модели прогнозирования;

4) разработка сценария для принятия рекомендаций нормативного характера по безопасной работе АЭС.

В настоящее время все перечисленные виды мониторинга контролируют безопасное размещение и эксплуатацию АЭС. Уровень автоматизации каждого из них различен из-за специфики контролируемых параметров. Процесс повышения уровня автоматизации мониторинговых систем непрерывен и зависит от достижений науки и техники.

#### 4. Комплексный подход к исследованию сейсмостойкости АЭС

Комплексный подход к исследованию сейсмостойкости конструкций может быть представлен в виде четырех основных этапов:

- определение исходных параметров колебаний грунта на площадке АЭС;
- анализ взаимодействия грунтов и строительных конструкций, динамический анализ конструкций;
- определение спектров ответа на перекрытиях зданий атомных станций;
- сейсмический анализ прочности конструкций, оборудования и трубопроводных систем АЭС.

#### 5. Определение исходных параметров колебаний грунта на площадке АЭС

Для определения сейсмических воздействий применяется любой из перечисленных ниже методов (подходов) или их комбинаций, которые можно объединить в три основные группы:

**А.** Методы, использующие записи сильных землетрясений максимального расчетного уровня, происходивших на площадке, или имеющиеся аналоговые записи сильных землетрясений.

**Б.** Методы, основанные на моделях разлома:

- теоретический метод;
- полуэмпирический метод.

**В.** Методы, использующие стандартные спектры:

- методы синтезирования (моделирования, генерации) расчетных акселерограмм и спектров реакций с установленными оценками параметров движений грунта при расчетных воздействиях во временной или (и) спектральной форме.

Сейсмические воздействия в зависимости от степени изученности сеймотектонических и грунтовых условий площадки могут быть определены любым из методов или несколькими методами одновременно (нормативным, эмпирическим, полуэмпирическим и аналитическим). Примени-

мость каждого из методов должна быть обоснована в приложениях к конкретной задаче. Необходимо получить наиболее вероятные значения параметров сейсмических воздействий и оценку их неопределенности.

Исходные акселерограммы должны быть отобраны, модифицированы либо получены численными методами таким образом, чтобы их временные параметры (длительность акселерограмм, огибающая колебаний) и амплитудные параметры (пиковое ускорение, пиковая скорость, пиковые перемещения) соответствовали определенным для площадки по ее макросейсмическим характеристикам на основе анализа взаимодействия грунта и сооружения. Для проведения динамических расчетов сооружений, конструкций, оборудования и трубопроводов с учетом их месторасположения используются поэтажные акселерограммы.

### **6. Анализ взаимодействия грунтов и строительных конструкций и динамический анализ конструкций**

За последнее десятилетие произошел сдвиг в отношении проектировщиков к учету взаимодействия сооружений с грунтовыми основаниями. Практически во всех проектах в той или иной форме принимается во внимание податливость основания.

Наиболее распространенный подход к моделированию взаимодействия сооружений с грунтом – “платформенная модель”. Суть его состоит в том, что сейсмическое воздействие подается на жесткую платформу, на которой с помощью определенного подвеса закреплена модель сооружения. Обычно этот подвес включает в себя распределенные пружины и демпферы. Преимущество “платформенной модели” – возможность проведения ее расчета с помощью тех же программ, что и расчета сооружения на жестком основании.

Для сооружений на жестких фундаментах поверхностного заложения и для вертикально распространяющихся сейсмических волн в горизонтально-слоистой среде такая модель является точной при том дополнительном условии, что жесткостные и демпфирующие свойства (способность к затуханию вынужденных колебаний) подвеса точно моделируют динамические характеристики штампа на грунтовом основании. Считается, что для основания в виде однородного полупространства динамические характеристики (жесткости) с достаточной точностью могут быть представлены пружинами, а демпфирующие – вязкими демпферами.

В общем случае свойства пружин и демпферов, моделирующих динамические жесткости основания в виде жесткого штампа с линейными свойствами как функции частоты. Однако пока в большинстве расчетов за основу берется статическая жесткость штампа (иногда она определяется достаточно изощренными методами), а демпфирование учитывается либо заданием модальных коэффициентов на уровне примерно 5 %, либо постановкой так называемых “акустических” не отражающих границ (распределенных демпферов).

В расчетах ответственных сооружений атомных станций используются современные под-

ходы, призванные учесть все многообразие эффектов динамического взаимодействия сооружения с грунтом: волновое демпфирование в грунте, влияние заглубления фундаментов, отрыв верхней части заглубленных стенок фундамента от грунта, иногда взаимодействие через грунт соседних сооружений. Примером может служить опыт ФГУП “Атомэнергопроект” (г. Москва), где более 10 лет эксплуатируется комплекс программ динамического расчета систем “сооружение–основание”, переданный фирмой СИМЕНС в рамках программы ТАСИС и прошедший аттестацию в органе государственного регулирования ядерной и радиационной безопасности. Комплекс включает в себя программу синтеза акселерограмм по спектрам (AGA), программу расчета волновых полей в горизонтально-слоистых средах (SHAKE), программу расчета динамических жесткостей жестких штампов на слоистых основаниях (CLASSI), а также программу расчета в частотном диапазоне систем “сооружение-основание” (SASSI) и конечно-элементную программу (STRUDYN).

Использование этих программ позволило не только вскрыть резервы консерватизма, заложенные в традиционные методики (главным образом, в районе первых частот систем “сооружение–основание”), но и обнаружить появление в ряде случаев высокочастотных спектральных пиков, не улавливаемых традиционными методами. Кроме того, оказалось, что слоистость грунта, особенно верхних слоев, способна значительно влиять на расчетную реакцию сооружений, и этот эффект не нашел отражения даже в нормах типа ASCE4-98. Еще один вывод, к которому привел анализ результатов, – полный отказ от использования спектрального подхода при расчете систем “сооружение–основание” из-за существенного сцепления собственных форм через неоднородное демпфирование.

Главным препятствием для более широкого внедрения подобных подходов в практику расчетов пока остается недостаток качественных исходных данных о свойствах грунтовых оснований, прежде всего кривых зависимости свойств грунта от сдвиговых деформаций. Впрочем, в последнее время такие данные появляются.

### **7. Определение спектров ответа на перекрытиях зданий атомных станций**

В результате расчета параметров колебаний конструкций определяются акселерограммы и спектры реакций (ответов) для различных точек сооружений и конструкций по расчетным моделям, адекватно описывающим реальные конструкции.

### **8. Сейсмический анализ прочности конструкций АЭС**

Сейсмические повреждения зданий и сооружений АЭС могут стать причиной возникновения чрезвычайных ситуаций, усугубить ущерб от землетрясения и затруднить ликвидацию его последствий. Нормативные документы требуют обоснования устойчивости АЭС к сейсмическим воздействиям. Для обоснования применяются детерминисти-

ческие методы.

В последние годы в России появились первые работы по ВАБ АС при сейсмических воздействиях. Анализ повреждаемости ответственных строительных конструкций АС является важнейшей составляющей ВАБ АС. Под повреждаемостью элемента конструкции и здания в целом понимается условная вероятность его отказа (исчерпание несущей способности) при данном уровне сейсмического воздействия. Уровень сейсмического воздействия, соответствующий этому отказу, в ряде случаев может рассматриваться как предел сейсмостойкости элемента (им может быть сейсмическое ускорение).

Детерминистические анализы повреждаемости элементов пространственных сооружений в виде оболочек, боксовых или стержневых конструкций проводятся с учетом вида материалов элементов конструкции с использованием программ расчета, в том числе реализующих метод конечного элемента. Критерии сейсмической прочности определяются по федеральным нормам и правилам, а также по строительным нормам и правилам. Сейсмические нагрузки определяются в результате динамического анализа или анализа по спектру ответа для элементов с учетом их условий опирания.

### **9. Сейсмический анализ прочности оборудования и трубопроводных систем АЭС**

Сейсмические воздействия по своей природе имеют резонансный характер. Величина сейсмического воздействия на оборудование при заданной интенсивности землетрясения определяется собственными динамическими характеристиками оборудования (частотами и декрементами собственных колебаний). Эти характеристики определяются как конструкцией (конфигурацией, размерами, массой и свойствами конструкционных материалов самого изделия), так и (не в меньшей степени) теми же параметрами всех механически связанных с ними внешних элементов (опорных и несущих конструкций, крепежа, трубопроводной обвязки, теплоизоляции).

Разработчики и исследователи оборудования АЭС для проверки его сейсмостойкости используют расчетные методы (статический метод, линейно-спектральный метод и метод динамического анализа), а также экспериментальные методы лабораторной проверки (прежде всего испытания на вибростендах).

### **10. Анализ сейсмостойкости расчетными методами**

Проверочные прочностные расчеты – необходимый и единственно возможный этап создания сейсмостойкого оборудования и трубопроводов на стадиях их проектирования и изготовления. В России постоянно совершенствуются методы расчетного анализа. И здесь многое необходимо учитывать для обеспечения надежности расчетных анализов сейсмической прочности (выбор и обоснование расчетных схем, методики и программы расчетов).

Одна из главных задач при проектировании – предотвращение повреждений элементов трубопроводных систем при землетрясениях в результате значительного превышения уровня допускаемых напряжений в одном или нескольких сечениях, в результате соударений за счет превышения уровня допускаемых перемещений или, как следствие, исчерпания резерва долговечности. Колебания трубопровода при землетрясении на фоне накопленных повреждений от эксплуатационных нагрузок могут вызвать нарушения на объекте в момент землетрясения. Поскольку существует взаимное влияние между оборудованием и трубопроводами, расчетная динамическая модель трубопроводной системы разрабатывается с учетом этого фактора. Оборудование может оказывать очень большое влияние на параметры колебания трубопроводов и создавать сложное напряженное состояние в их элементах. Моделирование оборудования в большей мере, чем трубопроводов, определяется возможностями метода и реализующей его программы расчета. Если обоснование сейсмостойкости оборудования и его закрепления выполнены, то можно проводить проверочные расчеты сейсмической прочности трубопроводов без включения в расчетную модель оборудования.

Если расчетная программа позволяет, то включение в расчетную модель элементов, имитирующих оборудование, обеспечивает получение более точных результатов путем учета взаимного влияния оборудования и трубопроводов. Это позволяет проводить оптимизацию мероприятий сейсмической защиты оборудования и трубопроводов.

Поскольку сейсмостойкость трубопроводных систем обосновывают расчетными методами, вопросам построения динамических моделей придается большое значение.

Для сейсмического анализа необходимо:

- математическое моделирование колебаний;
- решение задач статического анализа, динамического анализа, анализа спектра реакций;
- учет демпфирования.

В последние годы разработано несколько вариаций методов определения параметров колебаний трубопроводов и оборудования при динамических нагрузках.

Программы динамических расчетов, используемые в России для обоснования сейсмостойкости сложных технологических систем, построены на комбинациях различных методов. Такое широкое развитие методов и программ стало результатом развернувшегося в 70 – 80-е годы массового проектирования и строительства атомных электростанций в сейсмически активных районах. В последнее время разработан ряд отечественных программ для компьютеров, но широко применяются и зарубежные программные средства, прошедшие аттестацию в органе государственного регулирования ядерной и радиационной безопасности.

С целью уменьшения трудоемкости расчетов наряду с “точными” методами для проектирования трубопроводов АЭС разработаны упрощенные способы оценки сейсмической прочности на ранних стадиях проектирования технологических систем.

Расчетное обоснование сейсмической прочности в соответствии с нормативным подходом и категорией по сейсмостойкости трубопроводов проводится с использованием спектров отклика для отметок установки неподвижных опор трубопровода или оборудования, включенного в расчетную модель, или для отметки подошвы сооружения с применением коэффициентов динамичности соответствующего типа строительных конструкций для требуемой отметки.

При оценке сейсмостойкости используются приведенные напряжения, которые определяются для различных сочетаний нагрузок для всех эксплуатационных режимов, включая нарушения условий эксплуатации, и условия испытаний, а также сейсмических нагрузок.

При оценке сейсмостойкости трубопроводов приведенные напряжения определяются по сумме составляющих общих или местных мембранных, общих или местных изгибных, общих и местных температурных и компенсационных напряжений, общих мембранных и общих изгибных от сейсмических воздействий с учетом концентрации напряжений.

Анализу сейсмической прочности как динамическим, так и статическим методом подвергаются трубопроводы, прошедшие этапы конструирования и оценку прочности с учетом статических и циклических нагрузок, а также удовлетворяющие критериям прочности при статических и циклических нагрузках в соответствии с требованиями нормативных документов.

Детальный анализ параметров колебаний включает определение сейсмической реакции в сечениях и в опорных элементах, в том числе проверку уровня максимальных перемещений для исключения взаимных соударений трубопроводов и их соударений со строительными конструкциями; изучение уровня сейсмических ускорений, возникающих в оборудовании; выбор вариантов обеспечения сейсмической защиты трубопроводов.

Для определения нагрузок на внутрикорпусные устройства оборудования при их колебаниях рассматриваются нелинейные задачи.

Вопросы обоснования сейсмостойкости трубопроводных систем АЭС постоянно развиваются и совершенствуются. Основное внимание уделяется достоверности методов расчета и компьютерных программных средств, расчетных моделей, значений учитываемого демпфирования.

### 11. Стендовые испытания

Для экспериментальных исследований требуются надежные методы и средства лабораторных и заводских исследований и испытаний.

В настоящее время методики проведения стендовых испытаний оборудования АЭС разработаны достаточно хорошо и используются для обоснования его сейсмостойкости.

Однако известно, что в зависимости от конструктивных особенностей, методов сборки, установки и закрепления оборудования на штатных местах в условиях АЭС его динамические характеристики могут значительно меняться.

Как показала проверка сейсмостойкости отдельных видов оборудования в условиях АЭС,

реакция однотипных изделий на одну и ту же динамическую нагрузку не одинакова. Результаты исследований свидетельствовали о необходимости проверки и подтверждения сейсмостойкости относящегося к I категории оборудования, установленного на АЭС.

Для решения этой задачи применяется экспериментально-расчетная методика, которая нашла свое отражение в нормативных документах, но она используется не так широко, как методика проведения стендовых испытаний, правомерно считающихся наиболее представительными и в ряде случаев достаточными.

Тем не менее следует заметить, что иногда проведение полномасштабных стендовых испытаний невозможно, например, выходных трансформаторов массой 60 т, трансформаторных подстанций, системы открытых распределительных устройств.

Разработанная в ФГУП "Атомэнергопроект" методика представляет собой основной документ для проведения экспериментально-аналитической оценки сейсмостойкости электротехнического оборудования, включая испытания на обнаружение резонансных частот и на устойчивость к синусоидальным вибрациям.

Методика позволяет судить о сейсмостойкости оборудования без проведения полномасштабных стендовых испытаний. Она распространяется в основном на комплектное электрооборудование (щиты, панели, шкафы, пульта и т.д.).

Испытаниям по данной методике может подвергаться оборудование, как полностью укомплектованное аппаратурой и находящееся в рабочем состоянии, так и с имитацией комплектующих грузами с эквивалентными массами. При этом изделие находится в нерабочем состоянии. В качестве сейсмического воздействия в методике используется синтезированная акселерограмма, а при определении устойчивости к синусоидальным вибрациям – гармонические нагрузки или широкополосные случайные вибрации.

Экспериментально-аналитический метод аттестации включает экспериментально-расчетное определение амплитудно-частотных характеристик и фазочастотных характеристик в контрольных точках изделия, экспериментальное определение границ виброустойчивости аппаратуры, входящей в состав изделия, вычисление реакции изделия на заданное сейсмическое (синусоидальное, широкополосное, импульсное) воздействие и сопоставление этой реакции с границами виброустойчивости аппарата, установленного в данной контрольной точке. Контрольные точки выбираются в местах размещения наиболее важных аппаратов, а также в зоне приложения импульсной нагрузки. Границы виброустойчивости определяются путем проведения вибрационных испытаний аппаратов.

Реакции изделия на сейсмическое (синусоидальное) воздействие вычисляются методом динамического анализа.

Учитывая значительный банк данных о виброустойчивости комплектующих, входящих в состав оборудования, которым располагает ФГУП "Атомэнергопроект", экспериментально-расчетный метод нашел достаточно широкое применение при

аттестации оборудования I категории на сейсмостойкость в условиях АЭС.

Практически все электротехническое оборудование российских АЭС прошло подобную аттестацию, а также стендовые испытания.

## 12. Результаты проверки и обеспечения сейсмостойкости ответственного технологического оборудования АЭС

При испытаниях на вибростендах каждое исследуемое оборудование, как правило, рассматривается без учета влияния опорных конструкций, трубопроводов и т.п. заданием граничных условий, принимаемых с той или иной степенью достоверности.

Достоверно воспроизвести в расчетных схемах либо при стендовых испытаниях все взаимодействия и взаимодействия оборудования с примыкающими конструкциями и системами невозможно, поэтому как при расчетных проверках, так и при испытаниях на вибростендах неизбежно несоответствие расчетных (или измеренных) собственных частот реальным значениям.

ВНИИАМ, как головной институт России по разработке большинства видов технологического оборудования АЭС, с 1980 г. проводит исследования и разработки по проверке и обеспечению сейсмостойкости разнообразного оборудования на всех стадиях его жизненного цикла – проектирования, изготовления, эксплуатации, продления проектных сроков эксплуатации, вывода из эксплуатации. Институт анализирует сейсмостойкость оборудования и систем безопасности АЭС при их функционировании на действующих АЭС в составе станционных систем, несущих и опорных конструкций, в реальных условиях монтажа, раскрепления и трубопроводной обвязки.

Эта деятельность осуществляется как на стадии первичного ввода в эксплуатацию (т.е. на пусковых блоках), так и в процессе эксплуатации при изменении исходных сейсмических данных либо нормативных требований (в сторону их ужесточения).

Новый перспективный метод расчетно-экспериментальной проверки сейсмостойкости технологического оборудования и трубопроводов на пусковых и действующих блоках АЭС используется с 1980 г., начиная с блоков ВВЭР-440 АЭС "Козлодуй" (Болгария).

В основу метода положено проведение динамических испытаний оборудования в составе станционных систем с использованием импульсного (ударного) возбуждения затухающих колебаний или резонансного возбуждения вынужденных колебаний в рабочем диапазоне частот (от 1–2 до ~ 30 Гц) с помощью специальных малогабаритных автоматизированных присоединяемых вибраторов с регулируемой частотой воздействия, прецизионных малогабаритных датчиков ускорений и перемещений, регистрирующей аппаратуры и анализаторов на базе мини-ЭВМ или "notebook". В результате испытаний для каждого обследуемого оборудования определяется реальный спектр собственных частот и логарифмических декрементов колебаний с учетом механического воздействия оборудования со всеми примыкающими конструкциями

и системами, т.е. в реальных условиях монтажа, раскрепления, трубопроводной обвязки и теплоизоляции на конкретных блоках АЭС. По полученным экспериментально значениям собственных динамических характеристик проводятся расчеты сейсмостойкости (как правило) по линейно-спектральному методу на основе поэтажных спектров ответов, разработанных проектными организациями для обследуемых блоков АЭС.

При неподтверждении сейсмостойкости составляются необходимые мероприятия для обеспечения сейсмостойкости. Они заключаются в повышении жесткости опорных конструкций, усилении крепежа, дополнительном раскреплении свободных частей протяженного оборудования, установке ограничителей перемещений. Лишь в единичных случаях потребовалась замена оборудования или его отдельных элементов при несоответствии конструкции оборудования требованиям сейсмостойкости. Эти случаи выявлены только на старых блоках АЭС, спроектированных без учета требований их сейсмостойкости или на основе устаревших расчетных методик и программ.

Внедрение метода позволило существенно повысить надежность и достоверность обследований и дополнительных мероприятий, а также сократить сроки выполнения работ и их стоимость.

За последние 20 лет специалистами ВНИИАМ выполнены обследования на 31 пусковом и действующем блоках 11 АЭС с реакторами ВВЭР-440, ВВЭР-1000 и РБМК в России, Болгарии, Венгрии, Словакии и на Украине. Обследовано более 200 типов и более 2500 единиц разнообразного технологического оборудования, а также отдельные виды электротехнического оборудования (основные обследования электротехнического оборудования выполняют специалисты ФГУП "Атомэнергопроект").

Естественная тенденция во всем мире – ужесточение нормативных требований к безопасности АЭС и к гарантиям ее обеспечения, а также периодический пересмотр сейсмической балльности площадок действующих АЭС в сторону ее увеличения – вызывают необходимость даже для оборудования, спроектированного и изготовленного в сейсмостойком исполнении, проводить периодические переповерки и разрабатывать дополнительные антисейсмические мероприятия в процессе эксплуатации АЭС. Особенно актуальна эта проблема для АЭС с большим сроком эксплуатации (20 лет и более), спроектированных либо без требований сейсмостойкости, либо по устаревшим нормативным требованиям и исходным сейсмическим данным. Исследования выполняются на основе индивидуального подхода, поэтому их результаты характеризуются достаточным консерватизмом.

До недавнего времени обследования сейсмостойкости во всем мире выполнялись по полному перечню ответственного оборудования и на основе чрезмерно консервативных нормативных требований и критериев. По мнению российских специалистов, это могло приводить как к существенному увеличению объемов и сроков проведения обследований, так и к росту денежных затрат на обоснование сейсмостойкости. Вероятно, по этой причине предложена и внедряется новая



упрощенная методика сейсмической переоценки действующих АЭС в США, направленная на существенное смягчение консервативных требований и критериев.

Идеи этой упрощенной методики сейсмической переоценки действующих АЭС рекомендуются для внедрения в странах Восточной Европы и в России. Для внедрения в России тех или иных методик требуется их изучение и экспертиза. Рассмотрим лишь один из факторов, подтверждающих необходимость адаптации методики для российских условий.

ПНАЭ-Г-7-002-86 и другими нормативными документами принято нормативное значение логарифмического коэффициента колебаний (декремента)  $\delta$  для технологического оборудования и трубопроводов АЭС, равное 0,02, при отсутствии достоверных экспериментальных данных.

При динамических исследованиях разнообразного технологического оборудования и трубопроводов на многочисленных блоках российских АЭС накоплен большой банк экспериментальных данных о декрементах колебаний в реальных условиях АЭС. Декременты колебаний часто превышают нормативное значение 0,02, но в отдельных случаях составляют 0,08 – 0,14, т.е. даже выше, чем рекомендуемые значения декремента в новых нормативах США. В то же время примерно в 70% случаев эти значения составляют от 0,02 до 0,05. Наконец, выявлены (правда, не многочисленные) случаи  $\delta < 0,02$ . Таким образом, принятие нормативного значения 0,05, как это предлагается в методике сейсмической переоценки действующих АЭС в США, чаще всего приведет к необоснованному занижению уровня сейсмических воздействий и поэтому вряд ли может быть принято в российских нормативах. Даже значение логарифмического декремента колебаний, равное 0,02, порой оказывалось завышенным. В расчетно-экспериментальных проверках сейсмостойкости оборудования на блоках АЭС в соответствии с нормативными требованиями необходимо использовать в расчетах фактические значения декре-

ментов оборудования в составе стационарных систем и конструкций, полученные экспериментальным путем. Поскольку уровень воздействий при динамических испытаниях на АЭС существенно ниже проектных сейсмических, реальные значения декрементов при землетрясениях за счет включения дополнительных демпфирующих нелинейностей будут выше. Это обеспечивает гарантированный запас по сейсмостойкости. Однако отсутствие достаточно полной и надежной количественной информации о повышении декрементов за счет включения дополнительных демпфирующих элементов и связей при реальных сейсмических воздействиях не дает оснований для формального повышения нормативных значений относительных декрементов выше принятого 0,02 (очевидно, с определенной смелостью, можно рассмотреть для новых редакций нормативных документов величину логарифмического декремента колебаний 0,03).

### Заключение

Обеспечение сейсмостойкости АЭС предполагает проведение комплекса работ (изысканий, исследований, расчетов, испытаний). Надежность этих работ должна контролироваться на основе программы обеспечения качества.

Два вопроса особенно важны на современном этапе для решения на национальном и международном уровнях:

- унификация и стандартизация подходов, методов, средств и испытательного оборудования, применяемых на действующих блоках АЭС при обследованиях сейсмостойкости и испытаниях оборудования и трубопроводов;
- создание международного банка экспериментальных данных по изучению динамического поведения компонентов блоков АЭС, включая демпфирование и резонансные явления в грунтах, конструкциях и материалах на основе специальных требований и критериев для отбора данных в этот банк.