

Подтверждение сейсмостойкости оборудования АЭС после монтажа

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

Показано, что собственные частоты и декременты колебаний оборудования АЭС могут быть определены только экспериментально непосредственно на энергоблоках АЭС в реальных условиях раскрепления оборудования, трубопроводной обвязки, теплоизоляции и др. Описан расчётно-экспериментальный метод, включающий натурное определение значений собственных частот и декрементов колебаний и перерасчёты сейсмостойкости по этим значениям. Методложен в основу разработанной и введённой в действие в 2012 г. “Методики подтверждения динамических характеристик систем и элементов энергоблоков АЭС, важных для безопасности”.

Ключевые слова: сейсмостойкость, оборудование АЭС, динамические характеристики, резонансы, собственные частоты, декременты колебаний.

Сейсмостойкость строительных сооружений, имеющих достаточно правильную геометрию, в современных проектах достаточно надёжно обеспечивается традиционными методами расчётов. Успехи в сейсмостойком строительстве зданий и сооружений подтверждаются примерами небоскрёбов, которые прекрасно выдерживают землетрясения весьма значительной интенсивности. Надёжность расчётного обоснования таких строительных сооружений, как реакторные отделения энергоблоков АЭС, обеспечивается тем, что при сейсмических воздействиях они ведут себя практически как абсолютно жёсткие тела, не подверженные резонансным колебательным процессам. Однако это положение никак не распространяется на оборудование и трубопроводные системы АЭС.

Предварительные расчётные оценки сейсмостойкости оборудования традиционными методами, безусловно, необходимы на стадии проектирования АЭС во избежание принципиальных ошибок в выборе конструкций и подборе оборудования. Однако проектное обоснование сейсмостойкости недостаточно для обеспечения гарантии сейсмостойкости оборудования.

Расчётные методы проверки сейсмостойкости имеют ряд ограничений принципиального характера. Во-первых, любые, даже самые совершенные и детализированные, расчётные схемы не могут в полной мере воспроизвести все детали и элементы сложного оборудования в их динамической взаимосвязи, и тем более сложно и зачастую не-

возможно учесть оказывающие существенное влияние на динамические свойства оборудования технологические допуски в дистанционирующих элементах, элементах скольжения, вращения и др. Во-вторых, собственные динамические характеристики, прежде всего частоты и декременты колебаний, проверяемого изделия зависят не только от его конструкции, конфигурации и материалов, но и от всех взаимосвязанных с ним элементов – опорных и несущих конструкций, трубопроводной обвязки, теплоизоляции. При расчётном анализе изолированного от внешних элементов оборудования возникает трудноразрешимая задача достоверного задания граничных условий, а зачастую эта задача вообще неразрешима, поскольку в ряде случаев такие вопросы, как прокладка трубопроводов, места и формы их гибов, места их жёсткого или упругого раскрепления, решаются в процессе монтажа “по месту”. Особо остро проблемы задания граничных условий проявляются при проектировании сейсмостойкой трубопроводной арматуры.

Чисто расчётные методы явно недостаточны для определения при сейсмических воздействиях работоспособности конструкций с подвижными элементами качения, вращения и линейного перемещения. Это, прежде всего, относится к насосам, вентиляционным агрегатам, быстродействующей арматуре, механизмам систем управления и защиты (СУЗ), транспортно-перегрузочным механизмам.

Сейсмические нагрузки на оборудование АЭС существенно зависят как от собственных частот

¹ Казновский Арсений Павлович: kaznovskyap@atech.ru

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 расчёты путём и проверяются при лабораторных испытаниях, однако эти данные нельзя считать надёжными как из-за ограниченных возможностей расчётов схем, математических программ, вычислительной и экспериментальной техники, так и вследствие, как уже было отмечено, принципиальной невозможности учёта на этой стадии условий монтажа, раскрепления оборудования и его динамического взаимодействия с опорными и несущими конструкциями, трубопроводной обвязкой, теплоизоляционными покрытиями.

Ввиду резонансного характера сейсмических воздействий определённые расчёты путём собственных частот колебаний, даже при расхождении с действительными всего на 1 Гц, могут привести к оценке сейсмического воздействия на оборудование, отличающейся от реальной в несколько раз [1], поэтому проведение чисто расчётов проверок сейсмостойкости не может быть достаточным средством подтверждения устойчивости оборудования при землетрясениях. Наш многолетний опыт показывает, что по отношению к оборудованию и трубопроводным системам расчёты без знания реальных значений собственных частот и декрементов дают очень низкую точность результатов: погрешность может достигать сотни процентов.

Как показал печальный опыт крупнейшей в мире японской АЭС “Касивадзаки-Карива”, подвергшейся сейсмическому воздействию в 2007 г., расчётоное обоснование сейсмостойкости оборудования и стендовые испытания на сейсмостойкость ответственного оборудования на стадии изготовления опытных образцов, широко (как нигде в мире) применяемые в Японии, станцию не спасли. Ущерб от землетрясения на АЭС составил тогда более 6 млрд. дол. США. Кроме того, радиоактивные выбросы в атмосферу и в море нанесли существенный вред окружающей среде.

Абсолютно неприемлемы методы механического переноса результатов анализа устойчивости оборудования при внешних воздействиях, полученных на одной АЭС, на аналогичное оборудование другой АЭС вследствие как различных форм спектров воздействий, зависящих от конкретной площадки размещения, так и того, что незначительные различия в трассировке примыкающих трубопроводов и методов раскрепления даже на одной АЭС приводят к различным динамическим характеристикам однотипного оборудования, к различным величинам внешних воздействий.

Неприемлемы также методы, описанные в материалах МАГАТЭ, которые предлагают использовать “универсальные” спектры сейсмических воз-

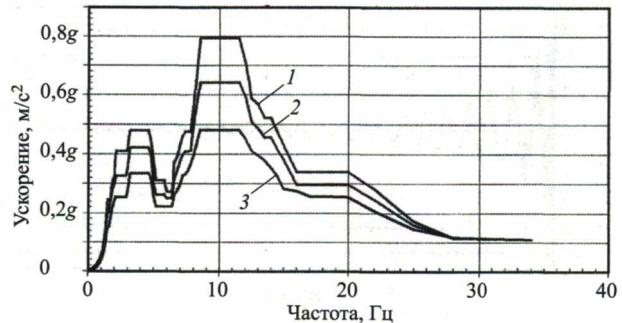


Рис. 1. Пример реального спектра ответов на сейсмическое воздействие на одной и той же высотной отметке и для одинакового направления (Ростовская АЭС, энергоблок № 2):

1, 2, 3 – затухание 0,02; 0,03; 0,05 соответственно

действий с декрементами колебаний 0,05, поскольку при реальных землетрясениях декременты всегда выше, чем при малых воздействиях, применяемых при определении динамических характеристик оборудования в условиях действующих или вводимых в эксплуатацию АЭС. Обследования на многочисленных АЭС показали, что очень часто декременты оказываются намного ниже значений, нормативно требуемых в РФ (0,02), а при увеличении воздействий при землетрясениях до реальных возрастают лишь в 1,5 – 2 раза. Итак, использование спектров с декрементами 0,05 приводит к недооценке сейсмических воздействий в резонансной области в 2 раза и более.

Таким образом, только метод поэлементной проверки важных для безопасности систем энергоблоков АЭС, включающий экспериментальное определение динамических характеристик (собственных частот и декрементов колебаний) в реальных условиях раскрепления и обвязки с внедрением при необходимости компенсирующих мероприятий, может гарантировать целостность этих систем и выполнение их элементами своих функций при внешних воздействиях. Динамические характеристики измеряются непосредственно на энергоблоках АЭС в реальных условиях раскрепления оборудования, трубопроводной обвязки, теплоизоляции и др. По значениям собственных частот и декрементов корректируются расчёты модели оборудования, по которым проводятся расчёты сейсмостойкости.

Силовые воздействия, применяемые при экспериментальном определении динамических характеристик, должны обеспечивать безопасность для испытываемых конструкций. Если при реальных сейсмических воздействиях расчёты уровней (проектного землетрясения – ПЗ, максимального расчётного землетрясения – МРЗ) ускорения, передаваемые на оборудование в местах его крепления, находятся в диапазоне примерно от 0,05 до 10,0g, то исходя из требования полной гарантии неповреждаемости конструкций при их испытании

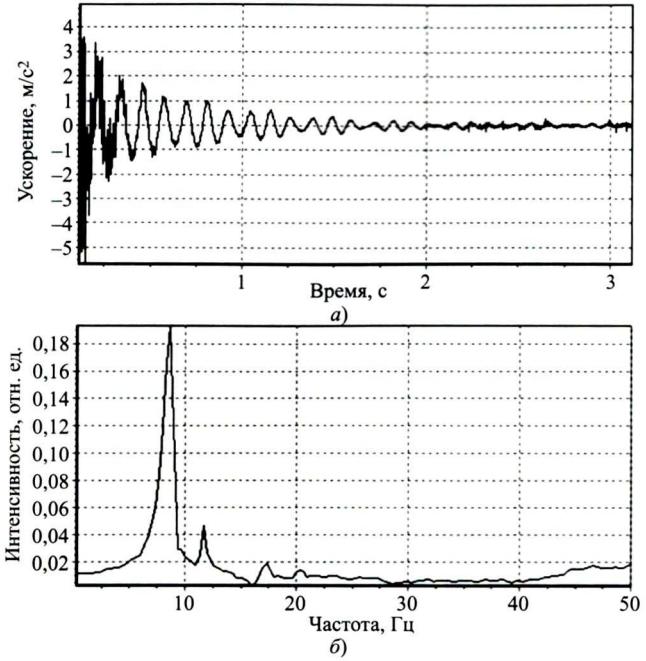


Рис. 2. Результаты динамических испытаний оборудования в условиях реального раскрепления:

a – акселерограмма затухающих колебаний; *б* – Фурье-спектр мощности

ях на АЭС силовые воздействия должны быть снижены на один-два порядка по сравнению с расчётными воздействиями при ПЗ и МРЗ.

Для определения собственных динамических характеристик систем и элементов энергоблоков АЭС был применён импульсный способ возбуждения затухающих колебаний, при котором возбуждение осуществляется либо смягчённым локальным ударом по опорной конструкции в плоскости центра масс (для корпусного оборудования), либо более совершенным и удобным для дальнейшего анализа путём, основанным на использовании разрывных оттяжек или специальных домкратов с регулируемым пороговым усилием, вызывающим необходимое начальное отклонение (изгиб) изделия от равновесного положения. В реальных условиях динамических испытаний при высокой чувствительности современных датчиков и регистрирующей аппаратуры достаточные амплитуды отклонений составляют от 5 до 10 мкм.

Применение компьютеров (типа Netbook) для регистрации исходных акселерограмм затухающих колебаний в оцифрованном виде позволяет обрабатывать их по стандартной процедуре, обычно с помощью быстрого преобразования Фурье (рис. 2). Такой способ регистрации и обработки даёт возможность определить полный спектр собственных частот во всём диапазоне сейсмических резонансов. Полученная амплитудно-частотная характеристика оборудования содержит набор пиков на собственных частотах.

Из двух важнейших для анализа сейсмостойкости оборудования собственных динамических характеристик – частот и декрементов колебаний – частоты оказывают более сильное количественное влияние: в резонансных максимумах воспринимаемые ускорения, а следовательно, сейсмические силы могут превышать их значения в зарезонансной области на один-два порядка при заданном значении декремента, тогда как при изменении декрементов в реальном диапазоне их возможных значений воспринимаемые ускорения в резонансной области частот изменяются лишь в несколько раз, т.е. менее чем на порядок (см. рис. 1).

Импульсный способ обеспечивает надёжное определение собственных частот колебаний. Что же касается декрементов, то авторы метода отдают себе отчёт в том, что их экспериментальные значения, получаемые при относительно слабых силовых воздействиях, диктуемых требованиями безопасности испытаний для оборудования, могут оказаться заниженными из-за возможного включения отдельных нелинейных элементов и связей при реальных сейсмических воздействиях. Однако в любом случае, как показывают проведённые эксперименты, декременты при реальных землетрясениях оказываются не более чем на 60% больше значений при слабых воздействиях, что приводит к завышению сейсмических ускорений, оцениваемых посредством слабых воздействий, на 10–20%, т.е. обеспечивает дополнительный запас динамической прочности при оценке сейсмостойкости.

В случае неподтверждения сейсмостойкости разрабатываются и внедряются обоснованные компенсирующие инженерные мероприятия. Выявляемая несейсмостойкость оборудования и трубопроводов на различных энергоблоках (от 5–10% на новых энергоблоках до 50% на “старых” энергоблоках), как правило, связана с несовершенством раскрепления опорных конструкций и их расположения, ограничителей перемещений, а также крепежа и требует разработки относительно простых и недорогостоящих антисейсмических мероприятий и средств.

Для существенного снижения сейсмических нагрузок на оборудование и трубопроводы оптимальна отстройка их собственных динамических характеристик из области сейсмических резонансов – перевод низших собственных частот в область выше 20–30 Гц. В случаях достаточно жёстких изделий (безбугельные клапаны, ряд видов насосов и др.) это достигается соответствующим раскреплением оборудования, т.е. созданием достаточно жёстких опорных конструкций, установкой ограничителей смещений и колебательных перемещений. Однако для значительной части оборудования такая мера оказывается практически неосуществимой, в этих случаях определяющим фактором в обеспечении сейсмостойкости служит надёжное знание декрементов колебаний.

На практике во всех случаях неподтверждения сейсмостойкости были разработаны конкретные инженерно-технические максимально надёжные и экономичные мероприятия по обеспечению сейсмостойкости. Как правило, они сводились к усилению опорных конструкций и крепежа, к дополнительному раскреплению, к установке ограничителей перемещений. Лишь на старых энергоблоках (энергоблоки 1 и 2 АЭС "Козлодуй", первый блок Южноукраинской АЭС и др.) отдельные виды оборудования были заменены более сейсмостойкими узлами.

Применяемый нами метод запатентован [2], лицензирован, признан МАГАТЭ как наиболее эффективный, оперативный и экономичный и реализован в рамках двух международных координационных программ МАГАТЭ на АЭС "Пакш" (ВВЭР-440), АЭС "Козлодуй" (ВВЭР-1000) и Ленинградской АЭС (РБМК-1000).

Высокая оценка метода со стороны МАГАТЭ стала одной из причин включения в федеральный нормативный документ НП-064-05 [3], введённый в 2005 г., нормативного требования обязательной экспериментальной проверки собственных динамических характеристик важного для безопасности оборудования на всех пусковых и ранее не обследованных действующих энергоблоках АЭС на территории России (п. 6.13).

Данный метод был положен в основу "Методики подтверждения динамических характеристик систем и элементов энергоблоков АЭС, важных для безопасности", разработанной в ОАО "Атомтехэнерго" с целью нормативного регулирования методических требований к определению собственных динамических характеристик с последующим обоснованием устойчивости к сейсмическим и другим внешним воздействиям систем и элементов АЭС [4]. Этот руководящий документ устанавливает методы определения собственных динамических характеристик (собственных частот и декрементов колебаний) систем и элементов (оборудования) энергоблоков АЭС, требования к техническим средствам проведения измерений, а также требования к процедуре, математическим моделям и программным средствам, применяемым для расчёта этих характеристик. Документ введен в действие приказом ОАО "Концерн Росэнергоатом" с 01.05.2012 г. и обязателен для всех пусковых и подлежащих продлению сроков эксплуатации энергоблоков российских АЭС.

При разработке документа 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.

Согласно МТ 1.2.2.04.0069-2012 [4], определение и экспериментальное подтверждение или уточнение собственных динамических характеристик элементов (оборудования) энергоблоков АЭС включает:

изучение проектной документации (установочных чертежей, паспортов изделий, произведённых ранее расчётов на прочность при нормальных условиях эксплуатации, расчётов сейсмостойкости);

визуальный осмотр оборудования, оценку соответствия или несоответствия проектным требованиям по монтажу и раскреплению;

экспериментальное определение собственных частот и декрементов колебаний оборудования в трёх ортогональных направлениях методом вынужденных или свободных затухающих колебаний;

разработку расчётных моделей оборудования на основе установочных чертежей и уточнённых данных по раскреплению, обвязке, опорным конструкциям и др.;

определение расчётных значений форм колебаний и собственных частот колебаний оборудования;

сопоставление экспериментальных и расчётных значений собственных частот колебаний оборудования;

уточнение и коррекцию расчётных моделей оборудования по экспериментальным значениям собственных частот колебаний.

По скорректированным расчётным моделям, учитывающим реальные условия монтажа и обвязки, проводятся окончательные расчёты оборудования на сейсмостойкость.

На основании данной методики для всех пусковых и действующих АЭС разрабатываются рабочие программы динамических испытаний важных для безопасности систем и элементов (оборудования) энергоблоков, по этим программам осуществляются измерения собственных динамических характеристик на пусковых энергоблоках при вводе в эксплуатацию, а на действующих энергоблоках – в рамках работ по обоснованию возможности эксплуатации энергоблоков за пределами назначенного срока службы на остановленном и приведённом в безопасное состояние энергоблоке во время планово-предупредительного ремонта.

Особенно актуальны обследования и динамические испытания на действующих энергоблоках, приближающихся к выработке проектного срока эксплуатации. На таких энергоблоках к отмеченным факторам объективного несовершенства расчётных проверок и лабораторных исследований добавляются последствия длительной эксплуатации: старение материалов, износ деталей и элементов, остаточные напряжения, накопление циклической усталости, замена и ремонт оборудования с возможным изменением конструкций, а также исходное несоответствие энергоблоков и оборудования современным нормативным требо-

ваниям, поскольку такие АЭС и энергоблоки проектировались либо без учёта требований в части сейсмостойкости, либо по устаревшим нормативным документам, математическим программам и исходным сейсмологическим данным.

Для энергоблоков, подлежащих продлению срока эксплуатации, на которых ранее уже проводились работы по экспериментально-расчёtnому обоснованию сейсмостойкости оборудования рассмотренным методом, надо учитывать то обстоятельство, что в периоды проверок энергоблоков ряд позиций важного для безопасности оборудования и систем по тем или иным причинам не вошёл в перечень проверяемого, особенно часто это относится к арматуре, электротехническому оборудованию (трансформаторы, ряд панелей и сборок) и к системам управления, сигнализации, связи, пожаротушения. Не менее важное значение имеет то, что за прошедшие после завершения обследований годы усовершенствовались знания и методики в области анализа сейсмостойкости, изменились (в сторону ужесточения) требования, конкретизировался ряд критериев.

Кроме того, например, применительно к АЭС “Козлодуй” крайне важен тот факт, что повторные (но на новом уровне) испытания и сравнение их результатов с полученными ранее позволяют выявить возникшие скрытые дефекты и отклонения во внутренних элементах и узлах оборудования, недоступные средствам неразрушающего контроля. Такой совершенно очевидный метод дополнительного анализа пригодности оборудования для дальнейшей эксплуатации будет в случае его реализации первым в практике продления сроков эксплуатации возрастных энергоблоков, поскольку именно по энергоблокам АЭС “Козлодуй” имеется богатейший материал динамических испытаний на ранней стадии их эксплуатации.

Для других энергоблоков, например для энергоблоков 1 – 4 Ленинградской АЭС с реакторами РБМК, на которых проводились детальные обследования сейсмостойкости оборудования на основе его динамических испытаний в рамках мероприятий по продлению сроков эксплуатации, необходимые для сравнения результаты обследований на начальных стадиях работы, к сожалению, отсутствовали.

Следует отметить также особую актуальность применения метода при сооружении АЭС по российским проектам за рубежом, поскольку практически все страны, где они строятся (или планируется их строить), относятся к зонам повышенной сейсмичности (Болгария, Индия, Иран, Китай, Турция и др.). Включение динамических обследо-

ваний на сейсмостойкость в обязательный состав работ по вводу в эксплуатацию энергоблоков таких АЭС и достигаемое при этом повышение сейсмической безопасности может стать серьёзным конкурентным преимуществом, которое необходимо использовать при подготовке конкурсных предложений и заключении контрактов.

Выводы

1. В связи с резонансным характером колебательных процессов, возникающих при сейсмических и других внешних воздействиях на оборудование АЭС, достоверная оценка этих воздействий определяется знанием реальных значений собственных частот и декрементов колебаний оборудования. Данные о фактических значениях динамических характеристик оборудования могут быть получены только экспериментально непосредственно на энергоблоках АЭС в реальных условиях раскрепления оборудования, трубопроводной связки, теплоизоляции и др. По экспериментальным значениям собственных частот и декрементов корректируются расчёные модели оборудования, по которым проводятся расчёты сейсмостойкости.

2. Предложенный экспериментально-расчётный методложен в основу “Методики подтверждения динамических характеристик систем и элементов энергоблоков АЭС, важных для безопасности” – МТ 1.2.2.04.0069-2012, разработанной в ОАО “Атомтехэнерго” в целях нормативного регулирования методических требований к определению собственных динамических характеристик с последующим обоснованием устойчивости к сейсмическим и другим внешним воздействиям систем и элементов АЭС.

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. Пат. 2284553 (РФ). Способ аттестации многоэлементной системы на сейсмостойкость / Казновский С. П., Казновский П. С., Казновский А. С., Мищенков В. Ф., Пискарёв В. В. Опубл. в Б. И., 2006, № 27.
3. Учёт внешних воздействий природного и техногенного происхождения на объекты использования атомной энергии. НП-064-05. – Ядерная и радиационная безопасность, 2006, № 3 (40).
4. МТ 1.2.2.04.0069-2012. Методика подтверждения динамических характеристик систем и элементов энергоблоков АЭС, важных для безопасности. Введена в действие с 01.05.2012 приказом ОАО “Концерн Росэнергоатом” № 9 / 234-П от 19.03.2012.