

«нагрев — приварка замыкающего шва — охлаждение», эксплуатационные — патрубку, изготовленному без предварительного подогрева, нагретому до рабочей температуры.

Результаты расчета по осесимметричной модели для верхнего сечения справедливы для патрубков с любым углом скоса нижнего края патрубка. В таблице приведены также значения линеаризованных по методике [2] напряжений в расчетных сечениях, которые используются при оценке циклической прочности с применением эффективного коэффициента концентрации напряжений.

Из таблицы видно, что распределение напряжений по сечению рубашки вблизи мест закрепления (концов конструктивного непровара) значительно отличается от равномерного распределения вдали от мест конструктивной неоднородности, где технологические напряжения составляют  $\sigma_z = 60,5$  МПа, а эксплуатационные (без предварительного подогрева)  $\sigma_z = -227$  МПа.

Анализ максимальных по абсолютной величине напряжений показывает, что подогрев сборки перед выполнением замыкающего сварного шва позволяет снизить уровень напряжений в зоне конца конструктивного непровара на 36 %.

Максимальные значения напряжений, полученные с использованием квадратичных конечных элементов в осесимметричной и объемной постановках, сопоставимы друг с другом. Максимальные значения напряжений, полученные с использованием линейных конечных элементов, примерно на 15 % меньше, чем с использованием квадратичных элементов. При этом они сопоставимы с линеаризованными значениями, полученными с использованием квадратичных элементов.

Таким образом, использование двух линейных конечных элементов по толщине рубашки в объемных расчет-

ных моделях вполне допустимо без проведения процедуры линеаризации.

## Выводы

1. Предварительный подогрев сборки патрубка с рубашкой до  $T = 100$  °C перед выполнением замыкающего сварного шва позволяет снизить эксплуатационные напряжения в рубашке на 27...36 %.

2. Применение технологии предварительного подогрева при сборке рубашки с патрубком приводит к увеличению радиального зазора между рубашкой и патрубком как минимум на 0,005 мм по отношению к номинальному значению, что необходимо учитывать при выполнении оценки циклической прочности рубашки. Принятие расчетного зазора величиной 0,1 мм обеспечивает дополнительный консерватизм расчета, поскольку такое увеличение наблюдается лишь в небольшой зоне, расположенной на некотором расстоянии от нижнего шва приварки рубашки.

3. Использование в трехмерных моделях для моделирования рубашки вместо квадратичных конечных элементов более простых линейных, с точки зрения точности результатов, вполне допустимо без проведения процедуры линеаризации.

## Список литературы

1. Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок ПНАЭ Г-7-002-86. — М.: Энергоатомиздат, 1989. — 525 с.
2. Боринцев А. Б., Федосов В. Г. К вопросу о применении эффективного коэффициента концентрации напряжений к результатам, полученным методом конечных элементов // Тяжелое машиностроение. — 2007. — № 6. — С. 2—5.

УДК 699.841.002.5:621.311.25:621.039

**Г. В. Встовский, д-р физ.-мат. наук, А. П. Казновский, П. С. Казновский  
(Всероссийский научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт  
атомного энергетического машиностроения)**

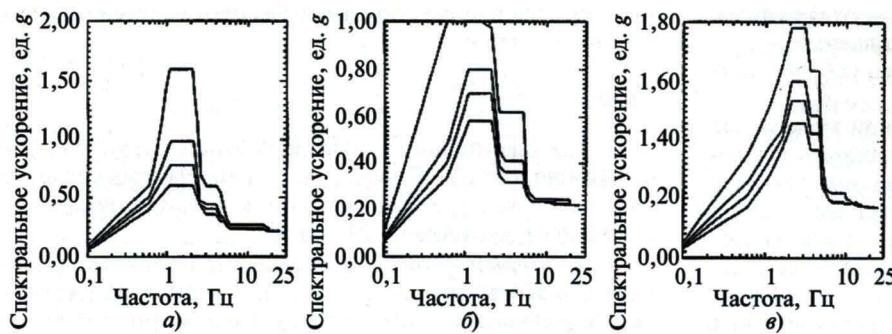
# Влияние декрементов колебаний на сейсмическую устойчивость оборудования АЭС и методы их определения

Увеличение сейсмической активности земной коры за последние 30—50 лет, бурный рост крупных городов, в том числе в регионах повышенной сейсмичности, а также интенсивное развитие промышленности и создание крупных промышленных объектов с потенциально опасными для людей и окружающей природы технологиями, к числу которых в первую очередь относятся АЭС и другие атомные объекты, диктуют необходимость совершенствования методов проверки и обеспечения сейсмостойкости как промышленных и гражданских объектов в целом, так и отдельных конструкций, единиц оборудования, узлов и т. д.

Сейсмические нагрузки носят резонансный характер, чем обусловлена их исключительная потенциальная опасность, так как относительно высокий уровень де-

формаций при резонансных колебаниях приводит либо к непосредственному разрушению элементов конструкций и оборудования, либо вызывает проявление эффектов усталостного повреждения материалов, которые трудно выявить без использования специальных методов. В атомном машиностроении накоплен огромный положительный опыт обеспечения сейсмостойкости конструкций и оборудования АЭС и разработаны перспективные методы обследования и аттестации [1].

Согласно современным нормам и рекомендациям [2—7], принятых для АЭС, первым этапом процедуры оценки сейсмостойкости является определение частот собственных (резонансных) колебаний конструкций (единиц оборудования) и их коэффициентов демпфирования (декрементов).



Спектры ответа АЭС «Козлодуй» (отметка 0,00 м) для различных направлений:  
а, б — горизонтальных; в — вертикального

Дополнительные нагрузки, обусловленные сейсмическим воздействием, определяются по декрементам на основе так называемых спектров ответа — зависимостям эффективного ускорения элемента оборудования от частоты колебаний при определенных декрементах (см. рисунок). Значения ускорений используются для вычисления дополнительных нагрузок на элементы оборудования и их сочленения на основе методов теоретической механики, например, с использованием стержневых схем с распределенными и сосредоточенными массами.

Экспериментально определенные собственные характеристики колебаний являются критерием правильности расчетов динамической прочности. Результаты экспериментального определения собственных характеристик колебаний, которое введено в 2006 г. как обязательное для всех пусковых и действующих блоков АЭС в России федеральными нормами НП-064-05 [7], являются критерием правильности расчетов на сейсмостойкость.

Таким образом, знание действительных собственных частот и их декрементов в реальных условиях монтажа, раскрепления и обвязки элементов конструкций и оборудования является принципиальным и обязательным для корректной оценки сейсмостойкости оборудования.

Основные методы определения собственных частот колебаний и их декрементов традиционно делятся на две категории: расчетные и экспериментальные.

Первые применимы только на стадии проектирования, так как в принципе не могут учесть все особенности состояния элементов оборудования и конструкций после их монтажа.

Экспериментальные методы можно разделить на несколько категорий. Лабораторные методы с использованием вибростендов не позволяют учитывать реальные условия раскрепления и обвязки испытуемых элементов. При модельных испытаниях на уменьшенных копиях оборудования и технологических систем, помимо сложных проблем выбора и обоснования надежных критериев масштабного и динамического моделирования, возникают объективные погрешности и отклонения от реальных условий, вызванные невозможностью строго воспроизвести и смоделировать все элементы, узлы и динамические связи сложных многокомпонентных систем и, тем более, учесть все технологические допуски, которыми сопровождаются изготовление, сборка и монтаж реального оборудования и технологических систем.

Динамические исследования при имитации сейсмических воздействий с помощью грунтовых взрывов, имея существенные преимущества перед лабораторными исследованиями, до настоящего времени не получили широкого применения из-за сложности и необходимости чрезвычайно больших капитальных и эксплуатационных материальных затрат.

Полномасштабные испытания технологических сборок на реальные сейсмовоздействия на специальных сейсмовзрывных полигонах смогут быть реализованы лишь в отдаленной перспективе.

В настоящее время оптимальным методом по затратам и оперативности представляются динамические неразрушающие исследования конструкций и оборудования непосредственно на пусковых и действующих объектах в реальных условиях монтажа, раскрепления и обвязки.

Метод расчетно-экспериментальной проверки сейсмостойкости оборудования и технологических систем на пусковых и действующих блоках АЭС разработан и освоен во ВНИИАМ и внедрен его специалистами на многочисленных блоках АЭС в России и ряде других стран [1, 8, 9].

В ходе таких испытаний осуществляется запись акселерограмм колебаний элементов в трех (и более) направлениях, соответствующих возможным модам собственных колебаний, с последующей цифровой обработкой — расчетом Фурье спектров мощности. По резонансным пикам спектров мощности определяются собственные частоты колебаний и их декременты [8, 9]. Съем и запись акселерограмм осуществляются с помощью уникального портативного комплекса на базе современных электронных компонентов. Далее проводится расчетное определение сейсмических нагрузок и сейсмостойкости оборудования и его основных элементов на базе экспериментально определенных значений собственных динамических характеристик и поэтажных спектров ответа [2, 4, 11].

Необходимость экспериментальной проверки собственных частот колебаний проверяемого на сейсмостойкость оборудования АЭС очевидна в связи с ненадежностью их расчетного определения с достаточной точностью и с тем, что наиболее опасные резонансные частоты находятся в весьма узкой области спектра (от 2 до 8 Гц), а пики ускорений в резонансах являются ярко выраженным (ускорения, а следовательно, и сейсмические силы в этой области могут на порядок превышать их значения за пределами резонансов).

Существенно меньшее внимание до последнего времени уделялось проблеме уточнения и повышения надежности знания реальных величин коэффициентов затухания (декрементов) колебаний. В мировой практике расчетов сейсмостойкости используются нормативные усредненные значения декрементов, полученные на основе обобщения весьма ограниченного экспериментального материала по затуханию колебаний в металлоконструкциях и железобетонных сооружениях без какой-либо попытки детализации для различных конкретных изделий по их конструкции, конфигурации, размерам, массе, конструкционным материалам, раскреплению и пр.

В российских нормативных документах по сейсмостойкости оборудования и трубопроводов АЭС для всех видов оборудования принято (либо рекомендовано) значение относительного логарифмического декремента 0,02 (2 %) от критического значения  $2\pi$  [2, 5]. В последние годы в ряде зарубежных нормативов (в частности, в США), а также в рекомендациях МАГАТЭ рекомендовано более высокое значение — 0,04 и даже 0,05 [10], что существенно снижает расчетные значения сейсмических воздействий на оборудование и конструкции в резонансной области. Однако такое «упрощение» проблемы обес-

печения сейсмостойкости оборудования АЭС без экспериментального обоснования является искусственным, чревато серьезными ошибками и в связи с этим, по мнению авторов, недопустимо.

С учетом изложенной ситуации специалисты ВНИИАМ в течение ряда последних лет организовали при проведении обследований АЭС систематические экспериментальные исследования реальных декрементов колебания оборудования.

В основу проведения экспериментальных исследований, обработки и анализа их результатов заложены как общие положения теории колебаний [12], так и развитый во ВНИИАМ спектральный метод определения декрементов, физико-математические основы которого достаточно подробно изложены авторами настоящей статьи в литературе [13]. В связи с последним авторы не стали повторять теоретические аспекты проблемы и излагают в обобщенном виде полученные результаты экспериментальных исследований на АЭС и вытекающие из них выводы.

Экспериментальные исследования декрементов колебаний разнообразного ответственного оборудования были выполнены и продолжаются на всех последних обследованных блоках: блок № 2 ВВЭР-440 Армянской АЭС; блок № 5 и № 6 ВВЭР-1000 АЭС «Козлодуй» в Болгарии; блоки № 1–4 ВВЭР-440 АЭС «Пакш» в Венгрии; блок № 1 ВВЭР-1000 Калининской АЭС; блоки № 1–3 РБМК-1000 Ленинградской АЭС. Обследованы сотни типов и более 1000 единиц оборудования, в перечень которого входят теплообменники, баки, насосы, фильтры, кондиционеры, клапаны, задвижки, вентагрегаты и ряд других видов технологического оборудования.

Диапазон экспериментальных значений относительных логарифмических декрементов колебаний,  $\delta$ , полученных в результате динамических испытаний оборудования в составе станционных опорных и несущих конструкций — реального монтажа, раскрепления и трубопроводной обвязки на перечисленных блоках АЭС, составил от 0,008 до 0,143. При этом около 10 % испытанных единиц оборудования имеют декременты  $\delta < 0,02$ ; ~ 30 % —  $0,02 < \delta < 0,03$ ; ~ 25 % —  $0,03 < \delta < 0,04$ ; ~ 20 % —  $0,04 < \delta < 0,05$  и ~ 15 % —  $0,05$  и выше.

Поскольку испытания с определением декрементов выполнены пока что на 12 блоках (всего к настоящему времени обследованы 30 блоков), дальнейшее накопление банка экспериментальных данных может несколько изменить представленное распределение по диапазону возможных значений декрементов, так и несколько расширить сам диапазон, однако вряд ли эти изменения могут быть сколь либо значительными в связи с достаточно большой статистикой (более 1000 проверенных единиц оборудования).

Таким образом, даже наиболее консервативное значение относительного логарифмического декремента колебаний  $\delta = 0,02$ , принятое в российских нормативных документах для расчетов сейсмостойкости технологического оборудования АЭС, примерно в 10 % случаев оказывается завышенным и приводит к существенному занижению расчетных сейсмических сил, действующих на оборудование и его элементы.

Принятое же в национальных нормативах США и некоторых других стран, а также в рекомендациях МАГАТЭ значение  $\delta = 0,05$  подтвердилось лишь примерно в 15 % случаев.

О масштабах возможных ошибок при расчетах сейсмостойкости оборудования с использованием различных рекомендаций по выбору расчетных значений декрементов можно судить по количественному влиянию декрементов на сейсмические воздействия в области резонансных час-

тот: при изменении декрементов от  $\delta = 0,008 + 0,143$  (диапазон полученных экспериментальных значений) сейсмическое воздействие (сейсмическая сила) может изменяться (возрастает с уменьшением относительного декремента) в 4–5 и даже более раз (см. рисунок).

Полученные на АЭС экспериментальные данные о затухании вынужденных колебаний позволяют сделать следующие важные для обеспечения сейсмической безопасности оборудования АЭС выводы.

Необходимо в предельно короткие сроки организовать и обеспечить проведение динамических испытаний на всех без исключения пусковых блоках и на действующих необследованных блоках с определением декрементов колебаний всего ответственного за безопасность АЭС технологического оборудования, как это регламентируется новыми федеральными нормами НП-064-05.

В переходной период организации и выполнения таких обследований для расчетов сейсмостойкости оборудования рекомендованное российскими нормами расчетов оборудования на прочность оборудования и трубопроводов АЭС (ПНАЭГ-7-002–86) значение  $\delta = 0,02$  является максимально допустимым.

Полное соблюдение документа НП-064-05 в части обязательного проведения динамических испытаний на стадии пусконаладочных работ должно быть обеспечено контрактными условиями при сооружении с помощью России всех АЭС в странах СНГ и дальнего зарубежья.

#### Список литературы

1. Казновский С. П. Направление и состояние исследований сейсмостойкости оборудования и пароводяной арматуры АЭС и АСТ // В сб.: Обеспечение сейсмостойкости атомных станций. — М.: Наука, 1987. — С. 81–96.
2. ПНАЭГ-7-002–86. Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. — М.: Энергоатомиздат, 1989. — 528 с.
3. Кириллов А. П., Амбринавиши Ю. К. Сейсмостойкость атомных станций. — М.: Энергоатомиздат, 1983. — 185 с.
4. РТМ-108.020.37–81. Энергетическое оборудование электростанций с водоводяными реакторами. Расчет на прочность при сейсмических воздействиях. Минэнергомаш. — Ленинград: ЦКТИ, 1981. — 38 с.
5. ОТГ-87. Арматура для оборудования и трубопроводов АЭС. — М.: ГАЭН, 1987. — 154 с.
6. Лукин В. В., Пискарев В. В., Зайцев В. А. Сейсмостойкость электротехнического оборудования собственных нужд АЭС // В сб.: Обеспечение сейсмостойкости атомных станций. — М.: Наука, 1987. — С. 61–87.
7. НП-064-05. Учет внешних воздействий природного и техногенного происхождения на объекты использования атомной энергии (федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии) // Ядерная и радиационная безопасность. — 2006. — № 3 (40). — С. 47–87.
8. Казновский П. С., Кравец С. Б. Анализ сейсмостойкости оборудования 1-го блока Ростовской АЭС // В сб.: Новые методы теоретических и экспериментальных исследований материалов, приборов и технологий. — Новочеркасск: ЮРГТУ, 2001. — С. 118–121.
9. Патент РФ № 2284553, МПК G01V1/00. Способ аттестации многоэлементной системы на сейсмостойкость / С. П. Казновский, П. С. Казновский, А. С. Казновский, В. Ф. Мищенков, В. В. Пискарев. — Опубл. 27.09.2006. Бюл. № 27.
10. Seismic Design and Qualification for NPPs. Safety Guide // Safety Series № 50-SG-D15. — Vienna: IAEA, 1992. — 80 р.
11. Кравец С. Б. Оценка сейсмостойкости технологических систем атомных станций. — М.: Энергоатомиздат, 2005. — 170 с.
12. Бидерман В. Л. Теория механических колебаний. — М.: Высшая школа, 1980. — 408 с.
13. Ветовский Г. В., Казновский П. С., Казновский А. П. Спектральный метод определения декрементов колебаний // Заводская лаборатория. — 2008. — Т. 74. — № 6. — С. 55–62.