

Выбор оборудования АЭС, подлежащего расчётно-экспериментальному подтверждению сейсмостойкости

- Емельянова А. Д., ОАО “Атомтехэнерго”
- Зайкин И. И., ОАО “Атомтехэнерго”
- Казновский А. П., канд. техн. наук, ОАО “Атомтехэнерго”
- Казновский П. С., канд. техн. наук, ОАО “Атомтехэнерго”
- Касьянов К. Г., канд. техн. наук, ОАО “Атомтехэнерго”
- Щугорев А. В., канд. техн. наук, ОАО “Атомтехэнерго”
- Рясный С. И.¹, доктор техн. наук, ОАО “Атомтехэнерго”

Обоснованы возможности снижения трудоёмкости расчётно-экспериментальных исследований сейсмостойкости оборудования в натурных условиях АЭС. Разработаны критерии и методы обоснования сокращения перечня исследуемого оборудования на первоначальном этапе натурных испытаний на базе предварительных оценок собственных частот конкретных единиц оборудования и опыта предыдущих проверок. Разработаны критерии отбора типопредставителей из группы идентичных единиц оборудования для проведения расчётного анализа на основании результатов испытаний по определению собственных динамических характеристик.

Ключевые слова: сейсмостойкость, оборудование АЭС, собственные частоты, резонансы, расчёт на сейсмостойкость, опорные конструкции.

На вводимых в эксплуатацию и действующих энергоблоках российских АЭС в соответствии с действующими нормативными документами [1, 2] проводится расчётно-экспериментальное подтверждение сейсмостойкости оборудования, важного для безопасности [3]. Необходимость проведения этих работ связана с резонансным характером сейсмических воздействий и обусловлена тем, что сейсмические нагрузки на оборудование в значительной степени зависят от его динамических характеристик – собственных частот и декрементов затухания колебаний, надёжное определение которых возможно только по результатам динамических испытаний в натурных условиях раскрепления и трубопроводной обвязки оборудования. В связи со значительной трудоёмкостью выполнения этих работ для многочисленного состава важного для безопасности оборудования энергоблока АЭС авторами проводятся исследования по обоснованию сокращения перечня оборудования, подлежащего расчётно-экспериментальным исследованиям сейсмостойкости.

Как показано в [4], возможности сокращения перечня обследуемого оборудования на этапе динамических испытаний весьма ограничены. Наиболее актуальна необходимость проведения испы-

таний по натуральному определению динамических характеристик для оборудования, имеющего собственные частоты колебаний в области низких частот, попадающие в резонансную область сейсмических воздействий.

Первоначальный перечень оборудования, подлежащего обследованию, формируется на первом этапе проверки из единиц первой категории сейсмостойкости с исключением:

вспомогательного малогабаритного оборудования, динамические характеристики которого вследствие его малой массы и большой жёсткости не попадают в область резонанса с сейсмическим возбуждением;

вспомогательной малогабаритной трубопроводной арматуры с ручным приводом ввиду её малой сосредоточенной массы, близкого расположения центра масс к оси трубопровода и, как следствие, слабого влияния на динамическое поведение трубопроводной системы;

крупногабаритного оборудования массой выше 100 т, жёстко связанного со строительными конструкциями, сейсмостойкость которого надёжно обеспечивается расчётными методами на стадии проектирования;

автономного электротехнического оборудования без внешних связей при строгом воспроизведении условий монтажа и раскрепления, регламен-

¹ Рясный Сергей Иванович: ryasny@atech.ru

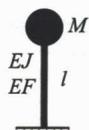


Рис. 1. Невесомый консольный стержень с сосредоточенной массой на конце

тированных техническими условиями и лабораторными заключениями о сейсмостойкости.

Основные типы подлежащего обследованию и входящего в итоговый перечень оборудования приведены в таблице. Результаты многочисленных исследований на энергоблоках Калининской, Ленинградской и Ростовской АЭС показали, что данные типы оборудования имеют низкие собственные частоты в резонансной области сейсмических воздействий.

В [4] показано, что, поскольку для всех типов оборудования по результатам предыдущих проверок выявляются единицы с динамическими характеристиками в области сейсмических резонансов, в настоящий момент нет возможности исключить из работы этап испытаний хотя бы для одного типа оборудования и ограничиться только проверкой соответствия раскрепления требованиям проекта. Однако имеется возможность в рамках некоторых типов отказаться от испытаний отдельных единиц оборудования, абсолютные копии которых, в том числе и в части раскрепления, были неоднократно испытаны в ходе предыдущих проверок, и при этом было выявлено совпадение значений собственных частот. В целях использования этой возможности для квалификации оборудования на сейсмические воздействия на основе систематизации и использования ранее полученных результатов авторами разрабатывается электронная база данных, полученных при предыдущих проверках.

Кроме того, сокращение количества испытаний может осуществляться на основании аналитической оценки низшей частоты собственных колебаний, при наличии данных о сечениях опорных конструкций и трубопроводов, а также о массе оборудования.

Упрощённая оценка может быть проведена по известным соотношениям (1), (2), приведённым в [5] для изгибных и продольных колебаний систем с одной степенью свободы, представляющих собой стержень длиной l с закреплённой на конце сосредоточенной массой M (рис. 1). Схема, изображённая на рис. 1, отражает поведение массивной единицы оборудования, расположенной на рамной конструкции, масса которой по сравнению с массой оборудования мала.

$$\omega_{\text{изг}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{3EJ}{Ml^3}}, \quad (1)$$

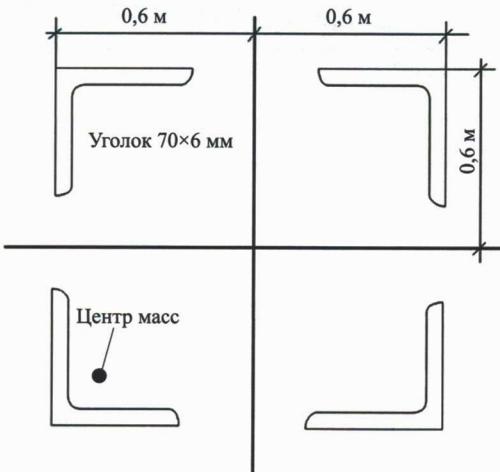


Рис. 2. Сечение опоры из четырёх равнополочных уголков

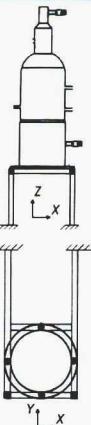
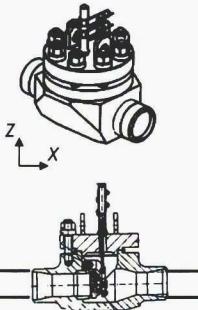
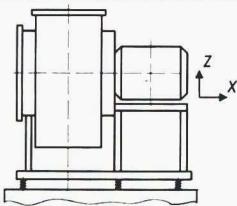
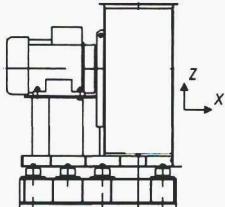
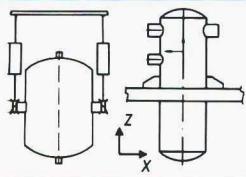
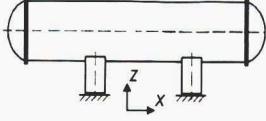
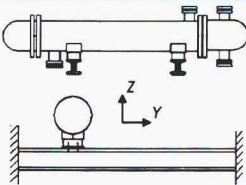
$$\omega_{\text{прод}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{EF}{Ml}}, \quad (2)$$

где E – модуль упругости материала опорной конструкции; F, J – суммарная площадь и наименьший момент инерции горизонтального поперечного сечения опорной конструкции.

Значение J определяется исходя из справочных данных о моментах инерции прокатных профилей, используемых при изготовлении элементов опорных конструкций, и геометрической конфигурации объекта. Вычисление можно проводить аналитически, используя теорему Гюйгенса – Штейнера для определения моментов инерции составных сечений, однако в современных условиях моменты инерции удобно вычислять с помощью программных средств проектирования и расчётного анализа. Например, для опоры из четырёх уголков сечением $70 \times 70 \times 6 \text{ мм}$ (рис. 2) при площади 3260 мм^2 наименьший момент инерции поперечного сечения составит 3866 см^4 .

Анализируя соотношения (1) и (2) для конкретного случая, можно получить приближённую оценку низших собственных частот колебаний системы и, в случае их расположения вне резонансной области сейсмических воздействий, ограничиться для данного оборудования проверкой раскрепления и соответствия требованиям проектной документации.

По графикам зависимости собственных частот от геометрических характеристик опорной конструкции можно для каждого конкретного значения массы оборудования отделить области значений геометрических характеристик, в которых ожидаются высокие частоты. В качестве примера на рис. 3 построены такие графики для оборудования массой 1000 кг (материал опорной конструкции – сталь с модулем упругости $E = 2 \cdot 10^{11} \text{ Па}$; диапазоны изменения F и J соответствуют реально

Масса, кг	Эскиз	Тип оборудования
Без ограничений*		Оборудование, установленное на металлических рамных конструкциях или промежуточных металлических строительных конструкциях
< 5000		Прямолинейные участки трубопроводов $D_y < 800$ с сосредоточенной массой: обратные клапаны и др.
Без ограничений*		Вентиляционные агрегаты и прочее оборудование, установленное на пружинных виброизоляторах
< 10 000		Вентиляционные агрегаты без виброизоляторов либо установленные на каучуковых (резиновых) виброизоляторах
Без ограничений*		Вертикально расположенные сосуды, закреплённые на балках перекрытий или подвесах: фильтр-ловушки, теплообменники
< 10 000		Горизонтально расположенные сосуды с собственными опорными конструкциями, установленные на фундаментах или бетонном основании: теплообменники, баки, парогенераторы, барабан-сепараторы
Без ограничений*		Горизонтально расположенные сосуды, установленные на балках перекрытий

Масса, кг	Эскиз	Тип оборудования
Без ограничений*		Трубопроводная арматура с вынесенным ручным или электрическим приводом (вентили, задвижки, шаровые краны D_y 10 – 1200), неопёртая (отсутствуют опоры под арматурой либо вблизи арматуры)
< 5000		Трубопроводная арматура с вынесенным приводом $D_y < 800$, опёртая (закреплена непосредственно под арматурой или вблизи арматуры): быстродействующая редукционная установка сброса пара в атмосферу, предохранительный клапан парогенератора и др.

* Включает все разномассовые единицы оборудования.

встречающимся на АЭС типам опорных конструкций). Видно, что частоты изгибных колебаний ниже 30 Гц ожидаются лишь при высоте опорных конструкций более 1 м, частоты продольных колебаний ниже 30 Гц – лишь при высоте опорных конструкций более 1,5 м. Анализируя по построенным графикам опорную конструкцию, сечение которой представлено на рис. 2, можно сделать вывод о том, что при расположении на ней оборудования с массой 1000 кг при любой её высоте (“разумный” диапазон от 0,4 до 1,4 м) ожидаются частоты собственных изгибных колебаний ниже 50 Гц.

Рассмотрим влияние массы опорной конструкции на частоты изгибных и продольных колебаний системы, представленной на рис. 1. Такая схема может отражать поведение системы оборудование – опорная конструкция и при соизмеримых значениях массы единицы оборудования и опорной конструкции. При стремлении параметра M к нулю или очень малому значению данная схема будет отражать поведение корпуса (каркаса) необвязанного оборудования, масса которого достаточно равномерно распределена по высоте. Согласно соотношениям, приведённым в [5], частотное уравнение для продольных колебаний такой системы имеет вид

$$\frac{\omega l}{\sqrt{E/\rho}} \tan\left(\frac{\omega l}{\sqrt{E/\rho}}\right) - \frac{\rho Fl}{M} = 0, \quad (3)$$

где ρ – плотность материала опорной конструкции.

Корни данного уравнения определяются численно. На рис. 4 показаны зависимости низшей собственной частоты продольных колебаний системы от высоты опорной конструкции как с учётом, так и без учёта её массы. Видно, что учёт массы опорной конструкции снижает оценённую

собственную частоту, но расхождение уменьшается с уменьшением площади сечения конструкции, и предварительная грубая оценка согласно формуле (1) окажется более справедливой для конструкций меньшей площади.

Графики, аналогичные изображённым на рис. 4, могут быть построены для различных значений массы оборудования. Пользуясь ими, можно ограничить области значений параметров систем

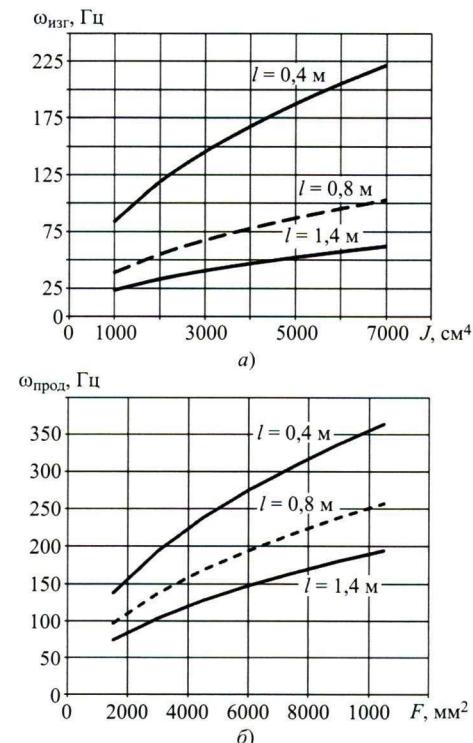


Рис. 3. Зависимости низших частот собственных колебаний от геометрических характеристик опорных конструкций, оценённые по формулам (1) и (2):
а – изгибные колебания; б – продольные

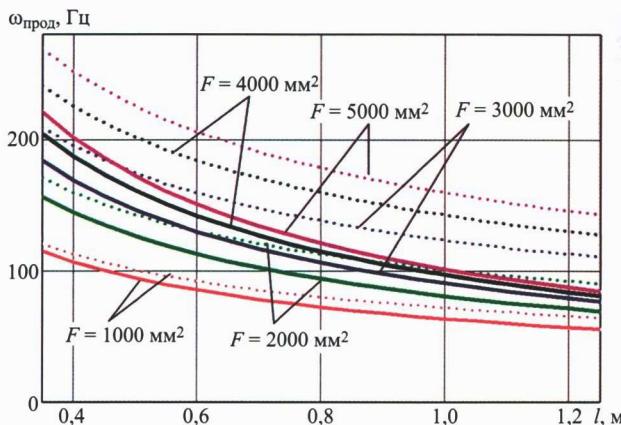


Рис. 4. Зависимости низшей частоты собственных продольных колебаний системы от высоты конструкции с учётом и без учёта массы опорной конструкции:

сплошные линии – с учётом массы опорной конструкции, пунктирующие – без её учёта

мы, при которых ожидаются высокие (например, выше 50 Гц) собственные частоты.

Рассмотрим случай изгибных колебаний системы, представленной на рис. 1, с учётом массы опорной конструкции. Для данного случая в [5] в графическом виде представлена связь частотного параметра $\alpha = \sqrt{m(2\pi\omega)^2/EJ}$ (m – масса единицы длины опорной конструкции, т.е. интенсивность массы) с параметром $M/(ml)$, показанная пунктирной линией на рис. 5.

Нами получена зависимость, аппроксимирующая эту связь (рис. 5, сплошная линия) в виде соотношения (4)

$$\alpha l = 1,379 \exp \left[-0,35 \left(\frac{M}{ml} \right)^{0,8} \right] + 0,496. \quad (4)$$

Относительная разность значений при такой аппроксимации составляет не более 15% в интервале значений $0 < M/(ml) < 1$, не более 10% в ин-

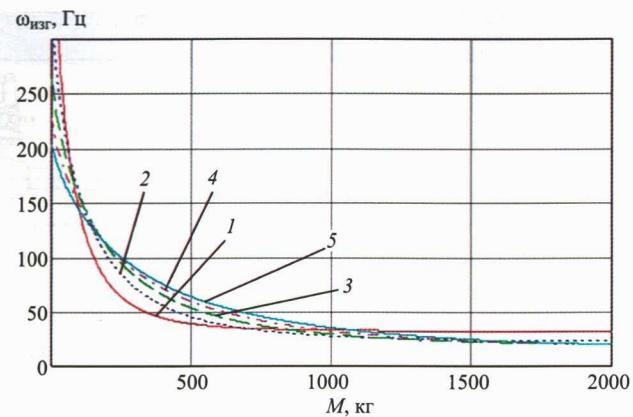


Рис. 6. Зависимости низшей собственной частоты изгибных колебаний системы, представленной на рис. 1, от массы оборудования:

1 – $m = 50 \text{ кг/м}$; 2 – $m = 100 \text{ кг/м}$; 3 – $m = 150 \text{ кг/м}$; 4 – $m = 200 \text{ кг/м}$; 5 – $m = 250 \text{ кг/м}$

тервале значений $1 < M/(ml) < 3$ и не более 6% в интервале $0 < M/(ml) < \infty$. Как видно из рис. 5, оценка собственной частоты с применением аппроксимирующей функции для интервала $0 < M/(ml) < 1$ может оказаться завышенной на величину до 15% по отношению к оценке, выполненной по методике, представленной в [5]. Полученные погрешности следует принимать во внимание при выполнении оценки низшей собственной частоты каждой конкретной системы.

После преобразования уравнения (4) явное выражение для первой собственной частоты изгибных колебаний системы, представленной на рис. 1, с учётом массы опорной конструкции принимает вид

$$\omega_{\text{изг}} = \frac{\left\{ 1,379 \exp \left[-0,35 \left(\frac{M}{ml} \right)^{0,8} \right] + 0,496 \right\}^2}{2\pi} \sqrt{\frac{EJ}{ml}}. \quad (5)$$

Графическое представление данной связи показано на рис. 6. Приняты следующие значения параметров системы: $l = 0,6 \text{ м}$, $J = 10000 \text{ см}^4$.

Предварительную оценку значений собственных частот можно выполнить численно, с помощью метода конечных элементов, имея в наличии программу, автоматически выполняющую построение расчётной модели согласно введённым значениям параметров типовой системы.

Рассмотрим такую оценку для однопролётной балки кольцевого сечения с сосредоточенной массой, расположенной произвольно по длине трубы. Данная схема (рис. 7) отражает поведение арматуры с центром масс, расположенным вблизи оси трубопровода.

Система в качестве исходных включает значения следующих параметров:

длин участков трубопровода до опор l_1 и l_2 ;

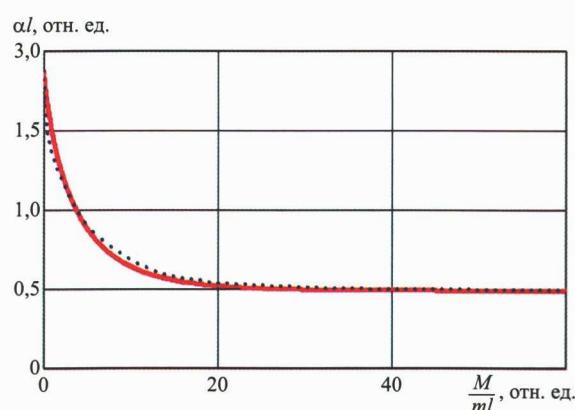


Рис. 5. Связь между параметрами колебательной системы, представленной на рис. 1:

пунктирная линия – зависимость, полученная в [5], сплошная – график аппроксимирующей функции

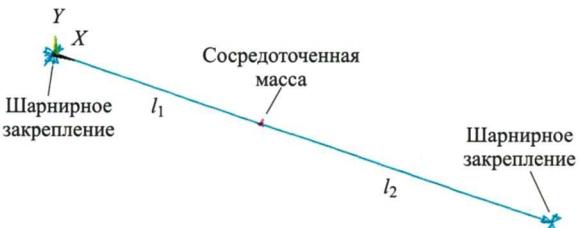


Рис. 7. Расчёчная модель однопролётной балки с сосредоточенной массой

сосредоточенной массы;
внешнего и внутреннего диаметров трубопровода;

характеристик материала.

Для примера приведём результаты расчёта собственных частот для трубопровода диаметром 89/79 мм (рис. 8).

Как видно из рис. 8, наиболее опасным с точки зрения попадания собственных частот в резонансную область землетрясения является расположение сосредоточенной массы на равных расстояниях от ближайших опор.

Подобные диаграммы-линии строятся для каждого конкретного трубопровода и позволяют отдельить области значений параметров участка трубопровода, для которых не ожидается частот изгибных колебаний трубопровода ниже 33 Гц (условная граница, выше которой ускорение сейсмического воздействия считается постоянным во всей части диапазона).

Аналогичным образом анализируется система, содержащая опору известной жёсткости непосредственно под арматурой (рис. 9).

Имея в наличии исходные данные о геометрических размерах арматуры и опор, можно и дальше уточнять расчётные схемы предварительного анализа частот. Стоит отметить, что по подробной

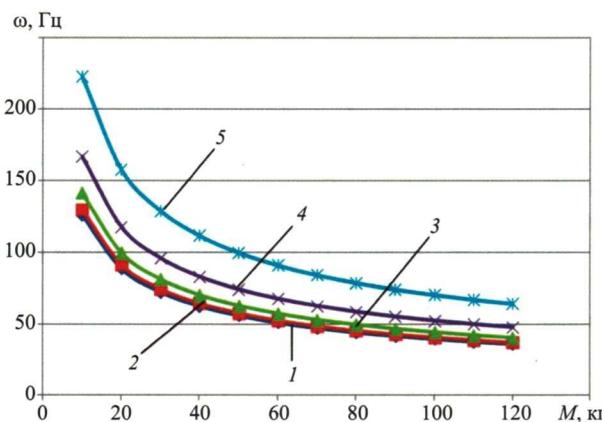


Рис. 8. Зависимости низшей частоты собственных колебаний системы, представленной на рис. 7, от сосредоточенной массы при различных соотношениях длин участков трубопровода:

1 – $l_1 = 0,6 \text{ м}, l_2 = 0,6 \text{ м}$; 2 – $l_1 = 0,5 \text{ м}, l_2 = 0,7 \text{ м}$; 3 – $l_1 = 0,4 \text{ м}, l_2 = 0,8 \text{ м}$; 4 – $l_1 = 0,3 \text{ м}, l_2 = 0,9 \text{ м}$; 5 – $l_1 = 0,2 \text{ м}, l_2 = 1,0 \text{ м}$

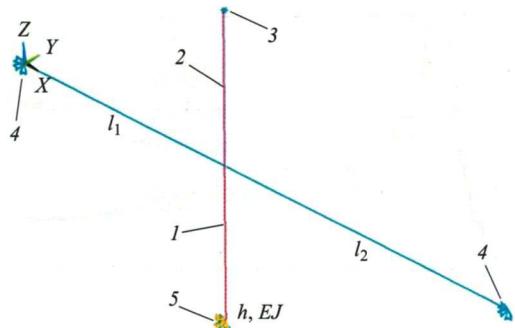


Рис. 9. Расчёчная модель трубопровода с опорой (1) под арматурой (2):

3 – сосредоточенная масса в центре масс системы арматура + привод; 4 – шарнирное закрепление; 5 – неподвижное закрепление

предварительной расчётной схеме под силу оценивать не только частоты, но и формы колебаний системы. Предварительные знания о формах колебаний системы принимаются во внимание при обработке результатов испытаний, существенно облегчая установление соответствия зафиксированных резонансных частот реально значимым формам.

Наиболее трудоёмким этапом обследования является расчётный анализ, который проводится выборочно для единиц, представляющих наибольшую опасность. Не все единицы оборудования, входящие в рабочий перечень расчёто-экспериментальной проверки, подлежат расчётному анализу. Часть объектов с учётом результатов испытаний квалифицируется на основании расчётов идентичных единиц (в том числе расчётов, выполненных ранее при обследованиях других энергоблоков), но на большие нагрузки.

Конечные перечни оборудования одного энергоблока, подлежащего проверке, содержат до 2000 единиц. По выполнении этапа динамических испытаний встаёт вопрос о выборе единиц, представляющих наибольшую опасность, подтверждение сейсмостойкости которых расчётом гарантирует сейсмостойкость оставшихся единиц с учётом результатов проведённых динамических испытаний по определению собственных динамических характеристик. Поскольку расчёты – наиболее трудоёмкая часть всей работы, крайне важно, чтобы число единиц, подлежащих расчётному анализу, оказалось минимальным.

На предварительном этапе перечень разделяется на группы, как правило, идентичных единиц, конфигурация расположения которых одинакова. Из каждой группы выбираются единицы, представляющие наибольшую опасность и подлежащие дальнейшему расчётному анализу.

Инерционные нагрузки, действующие на оборудование во время прохождения землетрясения, определяются видом поэтажных спектров ответа –

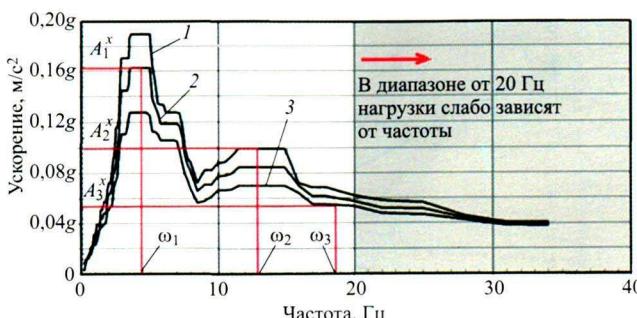


Рис. 10. Пример поэтажного спектра ответа, определяющего нагрузки на оборудование в условиях землетрясения в направлении X:

1, 2, 3 – логарифмический декремент колебаний соответствен-но 2, 3 и 5%; g – ускорение свободного падения

зависимостей между максимальными приобретёнными ускорениями и установленными экспериментально собственными динамическими характеристиками обследуемой единицы – собственными частотами и коэффициентами затухания (декрементами колебаний).

Согласно [6], расчёт на сейсмостойкость проводится одним из следующих методов:

статическим (в случаях, когда низшая экспериментальная собственная частота единицы оборудования выше 20 Гц);

линейно-спектральным.

В случае когда в группе идентичных единиц оборудования, расположенных в одинаковой конфигурации, все представители имеют низшую собственную частоту выше 20 Гц, вопрос о выборе одной наиболее опасной перестаёт быть актуальным, поскольку нагрузка в данном диапазоне частот слабо зависит от их значения (рис. 10). Отметим, что в данном случае группу единиц возможно квалифицировать и на основании обращения к разрабатываемой авторами базе данных, если оборудование ранее было рассчитано на более высокие нагрузки.

В случае когда лишь одна единица из группы имеет низшую частоту меньше 20 Гц, вопрос о выборе так же неактуален, поскольку, согласно [6], расчёт единственной, “выпавшей”, единицы следует выполнять линейно-спектральным методом.

Далее представим алгоритм ввода критериев выбора для случая, когда более чем одна единица из группы имеет низшие собственные частоты в диапазоне 0 – 20 Гц, т.е. при наличии необходимости выполнять расчёт линейно-спектральным методом.

Преимущество линейно-спектрального метода заключается в учёте вида собственных форм колебаний, поскольку данный метод основан на разложении системы дифференциальных уравнений движения по собственным формам.

Согласно [6, 7], при этом поведение конструкции в условиях действия сейсмического нагруже-

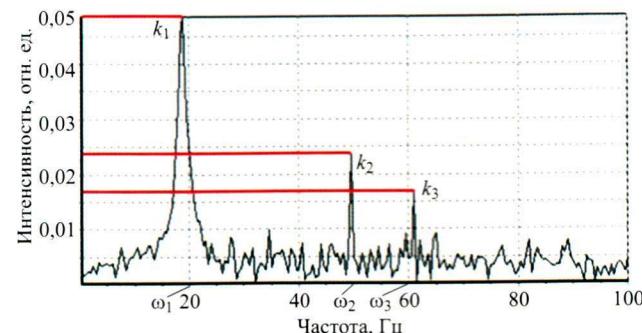


Рис. 11. Пример спектра Фурье экспериментально полу-ченной акселерограммы затухающих колебаний

ния рассматривается в двух горизонтальных и одном вертикальном направлении. Рассмотрим сейсмическое нагружение в одном из направлений – X. Вклад каждой из форм в движение конструкции вдоль оси X различен и может быть оценён введением соответствующих коэффициентов вклада k_1, k_2, \dots, k_n , где n – количество форм для каждой из схем, попадающих в исследуемый диапазон (обычно 0 – 33 Гц). Коэффициенты k определяются по высотам пиков на спектрах Фурье экспериментальных акселерограмм затухающих колебаний конструкции при сейсмическом воздействии (рис. 11). Значения интенсивности на спектрах получаются в результате обработки результатов испытаний в относительных единицах и могут быть использованы в качестве коэффициентов вклада соответствующих форм в движение вдоль осей при затухающих колебаниях.

Введём параметры A^X, A^Y, A^Z , характеризующие нагрузки по соответствующим направлениям следующим образом:

$$A^X = \sqrt{(k_1^X A_1^X)^2 + (k_2^X A_2^X)^2 + \dots + (k_n^X A_n^X)^2}; \\ A^Y = \sqrt{(k_1^Y A_1^Y)^2 + (k_2^Y A_2^Y)^2 + \dots + (k_n^Y A_n^Y)^2}; \\ A^Z = \sqrt{(k_1^Z A_1^Z)^2 + (k_2^Z A_2^Z)^2 + \dots + (k_n^Z A_n^Z)^2}, \quad (6)$$

где $A_j^X = A_1^X \div A_n^X, A_j^Y = A_1^Y \div A_n^Y, A_j^Z = A_1^Z \div A_n^Z$ – значения ускорений, взятые со спектров ответа в точке расположения оборудования, соответствующие экспериментальным частотам.

Например, на рис. 10 представлен спектр ответа для направления X, по которому определяются параметры A_j^X .

Аналогично определяются параметры для других направлений. Параметры A_j^X, A_j^Y, A_j^Z учитывают вид спектра ответа и коэффициент затухания колебаний.

В случае когда все три значения A для трёх соответствующих направлений для одной из единиц группы выше, чем для других единиц, данная единица выбирается для расчётного анализа. Её сейс-

мостойкость будет гарантировать сейсмостойкость нерассмотренных единиц.

В случае когда такая единица не выявляется, расчёт выполняется для нескольких единиц из группы, отобранных согласно следующим принципам:

наличию экстремального значения одного из параметров A^X, A^Y, A^Z ;

наибольшей сумме значений A^X, A^Y, A^Z .

В случаях когда выбранная единица является трубопроводной арматурой, по завершении расчётного анализа производится сопоставление его результатов с результатами проектного расчёта трубопровода.

Выводы

1. По результатам многочисленных натурных исследований на различных энергоблоках АЭС установлены основные типы оборудования, имеющие низкие собственные частоты в резонансной области сейсмических воздействий и подлежащие обязательному расчёто-экспериментальному подтверждению сейсмостойкости.

2. Разработаны критерии обоснованного сокращения перечня оборудования на этапе натурных испытаний путём исключения из списка оборудования первой категории сейсмостойкости единиц, для которых проверка не является необходимой.

3. Обоснована возможность проведения исключений на основании данных о расположении, обвязке, назначении, массовых характеристиках каждой конкретной единицы оборудования, в том числе с использованием предложенной методики предварительной аналитической оценки низших собственных частот колебаний системы оборудования – обвязка – опорные конструкции.

4. В связи с высокой трудоёмкостью расчёто-го анализа сейсмостойкости разработаны кrite-

рии отбора одного (нескольких) типопредставителя(ей) из группы идентичных единиц оборудования для проведения расчётного анализа на основании результатов испытаний по определению собственных динамических характеристик. Поскольку отобранные единицы представляют наибольшую опасность в условиях действия сейсмических нагрузок, подтверждение их сейсмостойкости гарантирует сейсмостойкость остальных единиц группы, для которых расчёты проводить не требуется.

Список литературы

1. Учёт внешних воздействий природного и техногенного происхождения на объекты использования атомной энергии. НП-064-05. – Ядерная и радиационная безопасность, 2006, № 3 (40).
2. 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). М.: Концерн Росэнергоатом, 2012.
3. Подтверждение сейсмостойкости оборудования АЭС после монтажа / Казновский А. П., Казновский П. С., Рясный С. И., Сааков Э. С. – Электрические станции, 2012, № 12.
4. Об объёме и составе расчёто-экспериментальных обследований сейсмостойкости оборудования АЭС / Емельянова А. Д., Казновский А. П., Казновский П. С., Касянов К. Г., Рясный С. И. – Электрические станции, 2013, № 1.
5. Прочность. Устойчивость. Колебания: Справочник / Под общ. ред. Биргера И. А., Пановко Я. Г. М.: Машиностроение, 1968, т. 3.
6. ПНАЭ Г-7-002-86. Нормы расчёта на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок (утверждены Госатомэнергонадзором СССР). М.: Энергоатомиздат, 1989.
7. НП-031-01. Нормы проектирования сейсмостойких атомных станций (утверждены постановлением Госатомнадзора России № 9 от 19 октября 2001 г.). М., 2001.