РУКОВОДЯЩИЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ МАТЕРИАЛ

ОБОРУДОВАНИЕ АТОМНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

РАСЧЕТ НА ПРОЧНОСТЬ ПРИ СЕЙСМИЧЕСКОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

РТМ 108.020.37—81

Издание официальное

gost.e-ecolog.ru

УТВЕРЖДЕН И ВВЕДЕН В ДЕЙСТВИЕ указанием Министерства энергетического машиностроения от 04.06.81 № ЮК-002/4365

ИСПОЛНИТЕЛИ: **В. В. КОСТАРЕВ**, канд. техн. наук (руководитель темы); **В. А. ВЕТОШКИН; А. Ю. ЩУКИН; Д. Л. КОСТОВЕЦКИЙ**, канд. техн. наук; **А. М. РЕЙНОВ**

© Научно-производственное объединение по исследованию и проектированию энергетического оборудования им. И. И. Ползунова (НПО ЦКТИ), 1986.

УДК 621.039.524:539.4 Группа Е02

РУКОВОДЯЩИЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ МАТЕРИАЛ

ОБОРУДОВАНИЕ АТОМНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

РАСЧЕТ НА ПРОЧНОСТЬ ПРИ СЕЙСМИЧЕСКОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

РТМ 108.020.37—81

Введен впервые

Указанием Министерства энергетического машиностроения от 04.06.81 № ЮК-002 4365 введен как рекомендуемый

Настоящий руководящий технический материал (РТМ) распространяется на оборудование и трубопроводы атомных энергетических установок (АЭУ). РТМ не распространяется на транспортные АЭУ.

РТМ устанавливает требования к расчету сейсмических нагрузок. С помощью расчетов можно проводить оценку сейсмостойкости объектов энергооборудования и трубопроводов АЭУ, а также определить мероприятия по обеспечению сейсмостойкости на стадии проектирования и в процессе эксплуатации оборудования. РТМ обязателен для предприятий и организаций отрасли энергетического машиностроения.

РТМ соответствует требованиям нормативно-технического документа МХО Интератомэнерго «Оборудование и трубопроводы АЭС. Нормы расчета на прочность. Поверочный расчет. Расчет на сейсмические воздействия» и «Норм расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок».

РТМ может быть применен для расчета сейсмостойкости оборудования тепловых электрических станций и объектов промышленной энергетики.

1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

1.1. Расчет на сейсмостойкость является обязательным этапом поверочного расчета оборудования и трубопроводов АЭУ и служит для определения возможности использования в сейсмических районах оборудования и трубопроводов атомных электростанций и теплоцентралей, опытных и исследовательских установок, спроектированных в соответствии с требованиями «Норм расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок».

1.2. Расчет на сейсмостойкость должен проводиться для оборудования и трубопроводов АЭУ, строящихся в районах с сейсмичностью 5 баллов и выше.

Необходимость расчета при сейсмичности 4 балла определяется проектной организацией.

1.3. Поверочный расчет оборудования и трубопроводов на сейсмостойкость следует проводить с учетом действия эксплуатационных и сейсмических нагрузок.

1.4. При антисейсмическом проектировании оборудование и трубопроводы АЭУ подразделяются на две категории сейсмостойкости:

к I категории относятся оборудование и трубопроводы групп А и В;

ко II категории относятся оборудование и трубопроводы группы С.

1.5. Расчет оборудования и трубопроводов АЭУ необходимо проводить на два вида воздействия: проектное и максимальное расчетные землетрясения, задаваемые генеральным проектировщиком в виде набора аналоговых или синтезированных акселерограмм и их спектрами ответа.

1.6. Максимальный уровень ускорения аналоговых и синтезированных акселерограмм, принимаемых в качестве характеристик расчетных землетрясений, не должен превышать значений, указанных в табл. 1.

Издание официальное Перепечатка воспрещена

Переиздание с Изменением № 1, утвержденным указанием Министерства энергетического машиностроения от 23.04.85 № СЧ-002/3260

Таблица 1

Максимальный уровень ускорений расчетных землетрясений

Сейсмичность площадки АЭУ	5	6	7	8	9	10
Максимальный уровень ускорений (в долях g)	0,025	0,05	0,1	0,2	0,4	0,8

1.7. При повышении или понижении установленной интенсивности расчетных землетрясений на 1 балл максимальный уровень ускорения заданных акселерограмм и (или) спектров ответа должен соответственно увеличиваться или уменьшаться в два раза.

1.8. Интенсивность *DE* при отсутствии специального сейсмологического обоснования устанавливается в соответствии с картами сейсмического районирования для I категории повторяемости (вероятность 0,5 за 50 лет), а интенсивность *MDE* принимается на один балл выше.

1.9. За правильность проведения расчета на сейсмостойкость ответственность несет предприятие или организация, выполнявшая расчет.

1.10. В настоящем РТМ приняты следующие условные обозначения:

$R_{p\,0,2}$ — минимальное значение предела текучести при расчетной температуре, МПа (кгс/мм²);

$[\sigma]$ — номинальное допускаемое напряжение, МПа (кгс/мм²);

$(\sigma_s)_1$ — группа приведенных общих мембранных напряжений с учетом сейсмических воздействий, МПа (кгс/мм²);

$(\sigma_s)_2$ — группа приведенных мембранных и общих изгибных напряжений с учетом сейсмических воздействий, МПа (кгс/мм²);

$(\sigma_s)_{1w}$ — группа приведенных напряжений растяжения в болтах или шпильках с учетом сейсмических воздействий, МПа (кгс/мм²);

$(\sigma_s)_{1w}$ — группа приведенных напряжений в болтах или шпильках с учетом сейсмических воздействий, МПа (кгс/мм²);

$(\sigma_s)_s$ — напряжения смятия, МПа (кгс/мм²);

$(\tau_s)_s$ — касательные напряжения среза, МПа (кгс/мм²);

σ_{kr} — критическое напряжение сжатия, МПа (кгс/мм²);

$[\sigma_F]$ — допускаемое напряжение сжатия, МПа (кгс/мм²);

k — относительное демпфирование (в долях от критического коэффициента демпфирования);

АЭУ — атомная энергетическая установка;

АЭС — атомная электрическая станция;

N — число степеней свободы расчетной модели;

СРМ — стержневая расчетная модель;

СА — синтезированная акселерограмма;

ЛСМ — линейно-спектральный метод;

МДА — метод динамического анализа;

СКД — спектр коэффициентов динамичности;

MSK-64 — 12-балльная шкала интенсивности землетрясений 1964 г., разработанная С. Медведевым, В. Шпонхоером и В. Карником;

g — нормальное ускорение свободного падения, м/с²;

$a(t)$ — акселерограмма сейсмического воздействия, м/с²;

$[M]$ — матрица коэффициентов инерции;

$[C]$ — матрица коэффициентов жесткости;

$\{\ddot{x}\}$, $\{\dot{x}\}$, $\{x\}$ — векторы относительных ускорений, скоростей и перемещений соответственно;

p, f — частота собственных колебаний, рад/с, Гц;

NOC (НУЭ) — нормальные условия эксплуатации;

MDE (МРЗ) — максимальное расчетное землетрясение;

DE (ПЗ) — проектное землетрясение.

1.11. В РТМ используются следующие понятия и определения:

землетрясение — колебания земли, вызываемые прохождением сейсмических волн, излученных из какого-либо очага энергии;

интенсивность землетрясения — мера величины сотрясения грунта, определяемая параметрами движения грунта, степенью разрушения сооружений и зданий, характером изменений земной поверхности и данными об испытанных людьми ощущениях;

сейсмичность — распределение интенсивности землетрясений во времени и в пространстве;

сейсмичность площадки строительства АЭУ — интенсивность возможных сейсмических воздействий на площадке строительства с соответствующими категориями повторяемости за нормативный срок. Сейсмичность устанавливается в соответствии с картами сейсмического районирования и микрорайонирования площадки строительства. Она измеряется в баллах по шкале MSK-64;

сейсмостойкость оборудования и трубопроводов АЭУ — способность конструкции сохранять прочность, устойчивость, герметичность и работоспособность при землетрясении в зависимости от ее роли в обеспечении радиационной безопасности;

акселерограмма землетрясения — запись процесса изменения во времени ускорения грунта (основания) для определенного направления;

аналоговая акселерограмма — запись реального землетрясения, используемая для расчета на сейсмостойкость;

синтезированная акселерограмма — акселерограмма, полученная аналитическим путем на основе статистической обработки и анализа ряда аналоговых акселерограмм;

ответная акселерограмма — акселерограмма точки конструкции, определяемая из расчета вынужденных колебаний при сейсмическом воздействии;

поэтажная акселерограмма — ответная акселерограмма отдельных высотных отметок сооружения, на которых установлено оборудование;

спектр ответа (реакций) — совокупность абсолютных значений максимальных ответных ускорений линейно-упругой системы с одной степенью свободы (осциллятора) при воздействии, заданном акселерограммой, определенных в зависимости от собственной частоты и параметра демпфирования осциллятора;

обобщенный спектр ответа — спектр, полученный по результатам обработки спектров ответа для набора аналоговых и (или) синтезированных акселерограмм;

спектр коэффициентов динамичности (СКД) — безразмерный спектр, полученный делением значений спектра ответа на максимальное абсолютное значение ускорения соответствующей акселерограммы;

статический метод расчета на сейсмостойкость — упрощенный метод, согласно которому распределение сейсмических нагрузок, действующих на конструкцию, принимается подобным распределению массы, а величины этих нагрузок определяются при помощи набора коэффициентов;

линейно-спектральный метод расчета на сейсмостойкость — метод, в котором величины сейсмических нагрузок определяются по спектрам ответа в зависимости от частот и форм собственных колебаний конструкции;

метод динамического анализа сейсмостойкости — метод численного интегрирования уравнений движения, применяемый для анализа вынужденных колебаний конструкции при сейсмическом воздействии, заданном акселерограммами землетрясений;

проектное землетрясение — землетрясение со средней повторяемостью один раз в 100 лет;

максимальное расчетное землетрясение — землетрясение со средней повторяемостью один раз в 10 000 лет.

2. ТРЕБОВАНИЯ К РАСЧЕТУ

2.1. Исходными данными для расчета на сейсмостойкость оборудования и трубопроводов АЭУ являются:

балльности *DE* и *MDE* и максимальные уровни ускорений расчетных акселерограмм;

воздействия от *DE* и *MDE* в виде поэтажных акселерограмм и (или) обобщенных спектров ответа для мест закрепления оборудования и трубопроводов по трем взаимно перпендикулярным направлениям (вертикального и двух горизонтальных);

нагрузки или внутренние усилия при нормальных условиях эксплуатации, а в необходимых случаях при нарушении нормальных условий эксплуатации и в аварийных ситуациях.

2.2. Расчет на сейсмостойкость необходимо проводить с учетом одновременного сейсмического воздействия во всех учитываемых направлениях.

2.3. Расчет на сейсмостойкость оборудования и трубопроводов АЭУ проводится статическим, линейно-спектральным методами, а также методом динамического анализа.

2.4. Поверочный расчет на сейсмостойкость следует выполнять по ЛСМ или МДА.

2.5. Статический метод используется для предварительной оценки уровня сейсмических нагрузок на начальных стадиях проектирования.

2.6. Статический и линейно-спектральный методы следует использовать только для расчета линейно-упругих систем. Метод динамического анализа не имеет ограничений по применению.

При расчете по МДА необходимо учитывать рассеяние энергии, а в необходимых случаях — нелинейные характеристики системы.

2.7. Оборудование и трубопроводы I категории должны рассчитываться на сочетания нагрузок *NOC+MDE* и *NOC+DE*. В случае если принятые для расчета акселерограммы *DE* и *MDE* различаются только уровнем ускорения и рассчитываемая система является линейной, допускается не рассматривать сочетание *NOC+DE*.

2.8. Оборудование и трубопроводы II категории должны рассчитываться на сочетание нагрузок *NOC+DE*.

2.9. Необходимость учета сочетаний сейсмических нагрузок с нагрузками при нарушении нормальных условий эксплуатации или аварийной ситуации устанавливается проектной организацией.

2.10. Значение относительного демпфирования k следует принимать равным 0,02. При наличии экспериментального обоснования допускается применение других значений.

2.11. В случаях когда расчетом не подтверждается обеспечение требований настоящего РТМ, должны быть приняты меры по снижению сейсмических нагрузок на рассматриваемое оборудование и трубопроводы.

2.12. Рекомендации по построению расчетных моделей оборудования АЭУ при анализе сейсмостойкости приведены в приложении 1.

2.13. Методы расчета оборудования АЭУ на сейсмостойкость и рекомендуемые программы расчета на ЭВМ изложены в приложении 2.

2.14. Рекомендуемая синтезированная модель сейсмического воздействия СА-482 для анализа сейсмостойкости при отсутствии необходимых исходных данных по п. 2.1 помещена в приложении 3.

2.15. Примеры расчета оборудования АЭУ на сейсмостойкость приведены в приложении 4.

2.16. Приближенный расчет трубопроводов на прочность при сейсмическом воздействии по статической теории сейсмостойкости изложен в приложении 5.

2.17. Рекомендации по антисейсмическому проектированию энергетического оборудования помещены в приложении 6.

3. ОЦЕНКА СЕЙСМОСТОЙКОСТИ

3.1. Оценку сейсмостойкости оборудования и трубопроводов АЭУ следует выполнять по допускаемым напряжениям, допускаемым перемещениям, допускаемым нагрузкам, критериям циклической прочности и устойчивости (последнее только для оборудования).

3.2. При оценке сейсмостойкости по допускаемым напряжениям должны учитываться только те эксплуатационные нагрузки или внутренние усилия, которые не релаксируются при возникновении в элементах местной или общей пластической деформации (весовые нагрузки, внутреннее и наружное давление, нагрузки от присоединенных коммуникаций).

3.3. Приведенные напряжения, сопоставляемые с допускаемыми, следует определять по теории наибольших касательных напряжений.

3.4. Оценку прочности элементов оборудования и трубопроводов АЭУ следует выполнять по допускаемым напряжениям, приведенным в табл. 2 и 3.

Таблица 2

Сочетания нагрузок и допускаемые напряжения для оборудования и трубопроводов

Категория оборудования и трубопроводов	Сочетание нагрузок	Расчетная группа категорий напряжений	Допускаемое напряжение
I	$NOC+MDE$	$(\sigma_s)_1$	$1{,}4\ [\sigma]$
		$(\sigma_s)_2$	$1{,}8\ [\sigma]$
	$NOC+DE$	$(\sigma_s)_1$	$1{,}2\ [\sigma]$
		$(\sigma_s)_2$	$1{,}6\ [\sigma]$
II	$NOC+DE$	$(\sigma_s)_1$	$1{,}5\ [\sigma]$
		$(\sigma_s)_2$	$1{,}9\ [\sigma]$

Примечание. Для трубопроводов АЭС, прошедших оценку прочности на этапах статических расчетов, допускается не проверять прочность по расчетной группе категорий напряжений $(\sigma_s)_1$.

Таблица 3

Сочетания нагрузок и допускаемые напряжения для болтов и шпилек

Категория оборудования	Сочетание нагрузок	Расчетная группа категорий напряжений	Допускаемое напряжение
I	$NOC+MDE$	$(\sigma_s)_{3\omega}$	$0{,}7R_{p0,2}$
		$(\sigma_s)_{4\omega}$	$1{,}1R_{p0,2}$
	$NOC+DE$	$(\sigma_s)_{3\omega}$	$0{,}6R_{p0,2}$
		$(\sigma_s)_{4\omega}$	$1{,}0R_{p0,2}$
II	$NOC+DE$	$(\sigma_s)_{3\omega}$	$0{,}75R_{p0,2}$
		$(\sigma_s)_{4\omega}$	$1{,}15R_{p0,2}$

3.5. Средние напряжения смятия для элементов крепежных деталей (шпонок, штифтов и т. п.) не должны превышать значений, приведенных в табл. 4.

Таблица 4

Сочетания нагрузок и допускаемые напряжения смятия крепежных деталей

Категория оборудования	Сочетание нагрузок	Расчетная группа категорий напряжений	Допускаемое напряжение
I	$NOC+MDE$	$(\sigma_s)_1$	$1{,}8R_{p0,2}$
	$NOC+DE$		$1{,}7R_{p0,2}$
II	$NOC+DE$		$2{,}0R_{p0,2}$

3.6. Средние касательные напряжения для элементов крепежных деталей (шпонок, штифтов, шпилек и болтов) не должны превышать значений, приведенных в табл. 5.

Таблица 5

Сочетания нагрузок и допускаемые касательные напряжения среза

Категория оборудования	Сочетание нагрузок	Расчетная группа категорий напряжений	Допускаемое напряжение	
			в шпонках и в штифтах	в болтах и шпильках
I	$NOC+MDE$	$(\tau_s)_s$	$0{,}45R_{p0,2}$	$0{,}35R_{p0,2}$
	$NOC+DE$		$0{,}4R_{p0,2}$	$0{,}3R_{p0,2}$
II	$NOC+DE$		$0{,}5R_{p0,2}$	$0{,}4R_{p0,2}$

3.7. Расчет на циклическую прочность должен проводиться в соответствии с требованиями «Норм расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. Расчет на циклическую прочность».

Допускается проводить расчет на циклическую прочность, используя максимальную амплитуду напряжений, определенную с учетом воздействий от *NOC* и *DE*. При этом число циклов нагружения принимают равным 50.

Расчет на циклическую прочность не проводится, если суммарная повреждаемость от нагрузок, действующих на оборудование и трубопроводы в процессе эксплуатации АЭУ, не превышает 0,8.

3.8. При расчете оборудования на устойчивость допускаемые напряжения должны приниматься следующими:

$$[\sigma_F] = 0{,}7\ \sigma_{kr} \quad \text{при} \quad \sigma_{kr} < R_{p0,2};$$

$$[\sigma_F] = 0{,}7\ R_{p0,2} \quad \text{при} \quad \sigma_{kr} \geqslant R_{p0,2}.$$

Оценка устойчивости трубопроводов не проводится.

3.9. Величины допускаемых перемещений (прогиб, сдвиг, смещение и т. п.) следует определять в зависимости от условий эксплуатации и требований к жесткости элементов конструкции (предотвращение выбора зазора и соударения элементов, недопустимые перекосы, разуплотнение герметичных стыков и т. п.).

3.10. Удельная нагрузка на упорный подшипник турбоагрегата при сейсмическом воздействии не должна превышать для подшипников с выравнивающей системой нагрузки на колодки 15 МПа; для других типов подшипников 10 МПа.

3.11. Удельная нагрузка на опорные подшипники скольжения при сейсмическом воздействии не должна превышать 10 МПа.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Рекомендуемое

РАСЧЕТНЫЕ МОДЕЛИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ АТОМНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК (АЭУ) ПРИ АНАЛИЗЕ СЕЙСМОСТОЙКОСТИ

1. ОСНОВНЫЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ И ХАРАКТЕРИСТИКИ РАСЧЕТНЫХ МОДЕЛЕЙ

1.1. Расчетной моделью энергооборудования при анализе сейсмостойкости называется динамическая система с конечным числом степеней свободы, достаточно полно отражающая основные динамические свойства рассматриваемого объекта оборудования или трубопровода, по реакции которой оценивается сейсмостойкость реальной конструкции.

1.2. Оборудование и трубопроводы АЭУ представляются пространственными, плоскими или одномерными стержневыми расчетными моделями (СРМ) в зависимости от конструктивных особенностей исследуемых объектов.

1.3. Стержневой расчетной моделью называется упругая динамическая система, состоящая из отдельных составных элементов — стержней, работающих в общем случае при сложном деформированном состоянии.

1.4. Плоской стержневой расчетной моделью называется динамическая система, движение точек которой происходит в одной плоскости, а ее упругие связи работают при плоском деформированном состоянии.

1.5. Частным случаем плоской стержневой расчетной модели является одномерная (цепочная) модель, движение точек которой происходит в одном направлении, а ее упругие связи могут быть представлены эквивалентными пружинами, работающими при растяжении — сжатии.

1.6. Комбинированная расчетная стержневая модель представляет собой пространственную модель с плоскими или одномерными подсистемами.

1.7. Масса конструкции, создающая при колебаниях инерционные нагрузки, сосредотачивается в узловых точках (узлах) расчетной модели.

1.8. Движение узлов расчетной модели может происходить в строго определенных направлениях, соответствующих выбранным обобщенным координатам.

1.9. Полное число обобщенных координат определяет число степеней свободы расчетной модели N.

1.10. При анализе сейсмостойкости могут быть использованы оболочечные динамические расчетные модели, если собственные частоты колебаний конструкции, соответствующие оболочечным формам, имеют значение ниже 30 Гц.

2. ОБЩИЕ ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ РАСЧЕТНЫХ МОДЕЛЕЙ

2.1. Основная задача построения расчетной модели при анализе сейсмостойкости состоит в определении условий идеализации конструкции (дискретизации, отображении упругих и диссипативных свойств с выбором соответствующих функциональных зависимостей), обеспечивающих необходимую точность оценки динамической реакции конструкции с приемлемыми затратами времени счета.

2.2. При построении упругой схемы СРМ руководствуются требованиями, предъявляемыми к расчетным моделям при оценке статической прочности. Дополнительно учитываются особенности элементов конструкции, динамическая работа которых отличается от статической (подвески трубопроводов, соединения с зазорами, демпфирующие устройства, антисейсмические амортизаторы, опорные устройства с сухим трением и т. п.).

2.3. Построение СРМ проводится в следующей последовательности:

предварительное разбиение системы на составные элементы;

назначение узловых точек;

назначение обобщенных координат;

определение инерционных и упругих характеристик;

анализ парциальных систем;

уточнение динамических характеристик СРМ.

2.4. Динамические характеристики СРМ определяются ее упругими, инерционными и диссипативными параметрами.

2.5. Разбиением системы на составные элементы приводят ее к дискретному виду, при этом учитываются динамические особенности анализируемой системы и внешнего воздействия, условия силового и деформационного взаимодействия отдельных элементов и проводится анализ влияния перечисленных факторов на величину динамической реакции системы.

2.6. Узлы СРМ следует располагать в местах наибольшей концентрации массы и наибольшей податливости конструкции, а также в точках, движение которых определяет взаимодействие элементов системы при колебаниях (места разветвления, присоединения к конструкции опорных связей, демпферов, амортизаторов и т. п.).

2.7. Для элементов оборудования, рассматриваемых в СРМ в виде стержней, изгибная или продольная деформация которых значительно меньше деформации примыкающих связей, узел следует размещать в центре масс этих стержней, а сам стержень допускается представлять в СРМ как абсолютно жесткое тело или связь.

2.8. В узлах СРМ назначаются обобщенные координаты. Каждой обобщенной координате должен соответствовать свой инерционный параметр.

2.9. Для назначения обобщенных координат СРМ могут быть применены два подхода — формальный и аналитический:

при формальном подходе узловые точки назначаются в каждом граничном сечении составных элементов СРМ. Каждый узел имеет от 3 до 6 степеней свободы. Анализ парциальных систем на этапе построения СРМ не проводится;

при аналитическом подходе предполагается анализ парциальных систем СРМ, на основании которого находятся узловые точки, число и направления обобщенных координат, исходя из заранее установленного уровня высшей собственной частоты расчетной динамической системы.

2.10. Аналитический подход позволяет построить СРМ с заранее ограниченным частотным уровнем, определяемым требованиями поставленной задачи. При этом используется критерий, согласно которому значение наибольшей парциальной частоты является низшей границей высшей собственной частоты динамической системы с конечным числом степеней свободы.

2.11. Сейсмическое воздействие представляет собой относительно низкочастотный процесс, характеризуемый частотным спектром от 0,1 до 40 Гц. С учетом этого нет необходимости отображать в СРМ все высшие формы собственных колебаний реальной конструкции.

2.12. При анализе сейсмостойкости линейно-упругих СРМ рекомендуется ограничиваться учетом высших форм колебаний, соответствующих значениям частот 120—150 Гц. Для нелинейной системы граничный частотный уровень системы принимается более высоким в зависимости от условий динамической работы элементов с нелинейными характеристиками.

2.13. Парциальные системы (системы с одной степенью свободы) образуются из СРМ путем наложения в узлах $N-1$ жестких шарнирных связей (опор) в направлении обобщенных координат. При введении вместо шарнирных связей жестких защемлений в узлах с обобщенными координатами, неортогональными координате парциальной системы, создается отсеченная парциальная система (ОПС). ОПС включает в себя часть СРМ и рассматривается независимо от общей системы. ОПС используется для определения инерционных параметров и оценки высших собственных частот СРМ.

Парциальные системы одномерной СРМ являются отсеченными.

2.14. При определении инерционных параметров рекомендуется использовать следующие приближенные способы:

в протяженных системах с равномерно распределенной массой и погонной изгибной жесткостью (трубопроводы, каркасы, длинные цилиндрические обечайки, балки и т. п.) инерционные параметры в узлах СРМ могут приниматься равными значению половины массы примыкающих к ним участков, заключенных между соседними узлами;

для абсолютно жестких тел СРМ в узел, расположенный в центре масс, приводится вся масса тела;

в общем случае сосредоточенная масса для j-й обобщенной координаты ($j=1\div N$) принимается равной массе части j-й ОПС, относительные перемещения которой при действии приложенной в узле ОПС статической нагрузки составляют более половины от перемещения узла. При определении статического прогиба ОПС допускается использовать упрощения, заменяя участки сложной конфигурации более простыми.

Приближенность приведенных способов определения сосредоточенных инерционных параметров практически не сказывается на значениях собственных частот и форм колебаний СРМ, определяющих динамическую реакцию рассматриваемой конструкции на сейсмическое воздействие.

2.15. Частота собственных колебаний i-й парциальной системы определяется по формуле

$$f_i=\frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{c_{ii}}{m_{ii}}},\quad i=1,2,\ldots,N,$$

где c_{ii} — диагональный элемент матрицы жесткости $[C]$; m_{ii} — коэффициент инерции для i-й парциальной системы.

Парциальная частота ОПС определяется (без использования матрицы жесткости системы) с погрешностью, идущей в сторону увеличения значения парциальной частоты.

2.16. Если наибольшая из парциальных частот f_i превышает 100—120 Гц и к СРМ не предъявляется специальных требований, рекомендуется упростить исходную расчетную модель, уменьшая число обобщенных координат, укрупняя составные элементы и перераспределяя инерционные характеристики системы.

2.17. Диссипация энергии в элементах энергооборудования при колебаниях учитывается с помощью задания величины относительного демпфирования k для упругой системы или отдельных элементов конструкции. Рекомендуемые значения относительного демпфирования k для различных конструкций приведены в таблице.

Значение относительного демпфирования k (в долях от критического) для конструкций оборудования АЭУ

Тип сооружения или оборудования	Значение относительного демпфирования	
	ПЗ	МРЗ
Системы трубопроводов большого диаметра ($D_y > 100$ мм) и оборудования	0,02	0,03
Системы трубопроводов малого диаметра ($D_y \leqslant 100$ мм)	0,01	0,02
Стальные конструкции:		
сварные	0,02	0,04
клепаные или на болтах	0,04	0,07
Бетонные конструкции:		
предварительно напряженные	0,02	0,05
армированные	0,04	0,07

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

Рекомендуемое

МЕТОДЫ РАСЧЕТА НА СЕЙСМОСТОЙКОСТЬ

1. СТАТИЧЕСКИЙ МЕТОД

1.1. При использовании статического метода расчетные сейсмические нагрузки на конструкцию распределяются подобно распределению массы и прикладываются независимо в двух горизонтальных и вертикальном направлениях.

1.2. Величины сосредоточенной Q_c или распределенной (q_c) сейсмических нагрузок определяются по следующим зависимостям:

$$Q_c = Qk_б k_в k_и; \qquad q_c = qk_б k_в k_и,$$

где Q и q — соответственно сосредоточенная и распределенная весовые нагрузки на оборудование или трубопровод;

$k_б$ — коэффициент балльности принимается по табл. 1;

Таблица 1

Значение коэффициента балльности

Сейсмичность площадки (в баллах)	9	8	7	6	5
Коэффициент балльности $k_б$	1,0	0,5	0,25	0,125	0,06

$k_в$ — коэффициент высоты размещения конструкции в здании или сооружении, который определяется по формуле $k_в = 1 + 0{,}05H$. Здесь H — отметка установки оборудования в здании АЭУ или наивысшая отметка крепления трубопровода (в метрах);

$k_и$ — коэффициент интенсивности нагрузки определяется в зависимости от низшей собственной частоты конструкции f_1 (Гц) по следующим условиям:

$$k_и = f_1, \text{ если } f_1 < 2;$$

$$k_и = 2, \text{ если } 10 \geqslant f_1 \geqslant 2;$$

$$k_и = \frac{20}{f_1}, \text{ если } 40 \geqslant f_1 > 10;$$

$$k_и = 0{,}5, \text{ если } f_1 > 40.$$

Если собственная частота конструкции не определяется, то $k_и = 2$.

1.3. Значение низшей частоты f_1 может быть приближенно определено по формуле

$$f_1 = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{g}{\lambda_{max}}},$$

где λ_{max} — максимальная абсолютная величина перемещения (прогиба) конструкции при действии весовых нагрузок Q и q в рассматриваемом направлении сейсмического воздействия;

g — ускорение свободного падения.

1.4. При определении вертикальной сейсмической нагрузки значение коэффициента $k_б$ при заданной балльности уменьшается в 2 раза, а коэффициент $k_в$ принимается равным 1.

1.5. Приведенные напряжения, получаемые из расчета на действие сейсмических нагрузок отдельно по каждому из учитываемых направлений, суммируются по среднеквадратичной зависимости, а затем алгебраически складываются с приведенными напряжениями от эксплуатационных нагрузок.

1.6. Статический метод расчета на сейсмостойкость применим для линейно-упругих систем. Метод дает оценку сейсмостойкости с погрешностью, идущей в сторону повышения запаса прочности и устойчивости.

2. ЛИНЕЙНО-СПЕКТРАЛЬНЫЙ МЕТОД

2.1. В линейно-спектральном методе расчета на сейсмостойкость используется принцип преобразования системы к нормальным координатам, который позволяет привести линейную динамическую систему с N степенями свободы к N независимым системам с одной степенью свободы (осцилляторам). Каждый из осцилляторов имеет собственную частоту и энергетические параметры, соответствующие одной из собственных частот и форм колебаний исходной системы.

2.2. Данное преобразование позволяет определить с помощью спектров ответа величину ответной реакции приведенных систем с одной степенью свободы и далее путем обратных преобразований получить ответные ускорения, инерционные силы и перемещения в исходной системе.

Линейно-спектральный метод, основываясь на ряде условий и допущений, упрощает решение задачи вынужденных колебаний системы при произвольном кинематическом воздействии и позволяет оценивать напряженно-деформированное состояние конструкции с погрешностью, идущей в сторону увеличения запаса прочности и устойчивости.

2.3. Для определения частот и форм собственных колебаний динамической системы вычисляются собственные значения λ_j и собственные векторы $\{X\}_j$ системы однородных алгебраических уравнений вида

$$\left([C]-\frac{1}{\lambda_j}[M]\right)\{X\}_j=0,\ j=1\div N,$$

где $\{X\}_j=\{X_{1j}, X_{2j}, \ldots, X_{ij}, \ldots, X_{Nj}\}$ — j-й собственный вектор, соответствующий собственному значению λ_j; элементы вектора $\{X\}_j$ соответствуют коэффициентам j-й формы собственных колебаний динамической системы с частотой $p_j=\sqrt{\frac{1}{\lambda_j^2}}$.

2.4. Вектор инерционных сейсмических нагрузок, действующих в направлении обобщенных координат системы при колебаниях по j-й собственной форме, определяется по формуле

$$\{S\}_j=[M]\{X\}_j\frac{\{X\}_j'[M]\{\cos\alpha\}}{\{X\}_j'[M]\{X\}_j}a_j,$$

где $\{\cos\alpha\}$ — вектор направляющих косинусов углов между обобщенными координатами системы и направлением сейсмического воздействия;

a_j — ускорение, определенное по спектрам ответа для частоты p_j.

2.5. Для определения сейсмических нагрузок в пространственной динамической системе при трехкомпонентном сейсмическом воздействии, заданном спектрами ответа для трех взаимно перпендикулярных направлений, рекомендуется использовать формулу

$$\{S\}_j=[M]\{X\}_j\frac{\{X\}_j'[M](\{\cos\alpha\}_x a_{jx}+\{\cos\alpha\}_y a_{jy}+\{\cos\alpha\}_z a_{jz})}{\{X\}_j'[M]\{X\}_j},$$

где $\{\cos\alpha\}_x$, $\{\cos\alpha\}_y$, $\{\cos\alpha\}_z$ — векторы направляющих косинусов углов между обобщенными координатами и направлениями сейсмического воздействия по осям системы координат x, y, z соответственно;

a_{jx}, a_{jy}, a_{jz} — ускорения осциллятора с частотой p_j, определенные по спектрам ответа, заданным для направлений x, y и z соответственно.

2.6. При расчете на сейсмостойкость, проводимом по ЛСМ, допускается определять сейсмические нагрузки не для всех форм собственных колебаний системы. Рекомендуется учитывать формы, соответствующие низшим собственным частотам, значения которых не превосходят наибольшую частоту, для которой заданы спектры ответа (обычно 30—40 Гц).

2.7. Для определения расчетных значений напряжений в сечениях конструкции используются величины результирующих внутренних усилий, которые вычисляются путем последовательных загружений системы сейсмическими нагрузками $\{S\}_j$ ($j=1\div s<N$) и затем суммируются по среднеквадратичной зависимости

$$N_k^p=\sqrt{\sum_{j=1}^{s}N_{kj}^2},$$

где N_k^p — результирующее усилие определенного типа (перерезывающая сила, изгибающий или крутящий моменты) в k-м рассматриваемом сечении;

N_{kj} — значение усилия определенного типа в k-м сечении, полученного для j-й формы колебаний.

2.8. Результирующие величины компонент внутренних усилий в сечении конструкции от сейсмического воздействия суммируются с соответствующими компонентами внутренних усилий от эксплуатационных нагрузок, при этом знаки первого и второго слагаемых принимаются одинаковыми.

2.9. Величины приведенных напряжений определяются по суммарным внутренним усилиям в сечении конструкции от сейсмических и эксплуатационных нагрузок.

2.10. Величины относительных перемещений в конструкции при сейсмическом воздействии допускается определять по формуле

$$x_i=\sqrt{\sum_{j=1}^{s}x_{ij}^2},$$

где x_i — расчетная величина смещения точки конструкции в направлении i-й обобщенной координаты ($i=1\div N$);

x_{ij} — i-й элемент вектора $\{x\}_j$, представляющий собой перемещение точки конструкций в направлении i-й обобщенной координаты при колебаниях по j-й собственной форме; вектор перемещений $\{x\}_j$ определяется по формуле

$$\{x\}_j=\{x_{1j}, x_{2j}, \ldots, x_{ij}, \ldots, x_{Nj}\}_j=\frac{1}{p^2}[M]^{-1}\{S\}_j.$$

3. МЕТОД ДИНАМИЧЕСКОГО АНАЛИЗА

3.1. При проведении динамического анализа вынужденных колебаний конструкции в качестве характеристик сейсмического воздействия используются акселерограммы основания (опор или мест закрепления) рассматриваемого объекта.

3.2. Динамический анализ сейсмостойкости конструкции, представленной в виде системы с конечным числом степеней свободы N, в общем случае нелинейной, выполняется методами численного интегрирования системы дифференциальных уравнений вида

$$[M]\{\ddot{x}\} + [C]\{x\} + \{B\} + \{R\} = -a(t)[M]\{\cos\alpha\}, \qquad (1)$$

где $\{B\}$ — вектор диссипативных сил (сил внутреннего неупругого сопротивления), возникающих вследствие несовершенной упругости рассматриваемой системы;

$\{R\}$ — вектор реактивных сил, возникающих от дополнительных, в том числе от нелинейных, связей системы;

$\{\cos\alpha\}$ — вектор направляющих косинусов;

$a(t)$ — ускорение движения основания, определяемое по акселерограмме.

3.3. Применение уравнений в конечных разностях позволяет выразить вектор относительных ускорений точек системы в каждый текущий момент времени n через векторы относительных перемещений

$$\{\ddot{x}_n\} = \frac{1}{\Delta t^2}(\{x_{n+1}\} - 2\{x_n\} + \{x_{n-1}\}), \qquad (2)$$

где Δt — малый интервал времени (шаг интегрирования);

$\{x_{n+1}\}$, $\{x_n\}$, $\{x_{n-1}\}$ — векторы относительных перемещений, соответственно для $n+1$, n, $n-1$ моментов времени.

3.4. Подставляя выражение (2) в формулу (1), получаем систему независимых алгебраических уравнений для определения вектора $\{x_{n+1}\}$ в зависимости от состояния системы в моменты времени n и $n-1$:

$$\{x_{n+1}\} = 2\{x_n\} - \{x_{n-1}\} - \Delta t^2 [M]^{-1}([C]\{x_n\} + a(t)[M]\{\cos\alpha\} + \{B_n\} + \{R_n\}). \qquad (3)$$

3.5. Численное решение системы уравнений (3) шаговым методом при заданных начальных условиях по перемещениям и скоростям, а также при определенном из условия сходимости и необходимой точности шаге интегрирования Δt дает параметры движения и внутреннего состояния системы для любого момента времени.

3.6. Рассеяние энергии при колебаниях рекомендуется учитывать по методике гистерезисного сопротивления, позволяющей определять неупругие усилия в системе или ее отдельных связях непосредственно из анализа их деформационно-силовой работы.

Преимуществами данной методики является отсутствие условной зависимости между диссипативными и динамическими (жесткостными и инерционными) характеристиками колебательной системы, а также возможность учета различных диссипативных свойств отдельных упругих связей и оценки внутреннего рассеяния в нелинейных связях. В качестве характеристики диссипации энергии используется значение относительного демпфирования, которое может быть определено из справочных данных для материала связи или экспериментально для отдельных элементов конструкции.

Применительно к шаговому методу численного интегрирования системы уравнений (1) элементы вектора диссипативных сил $\{B\}$, соответствующие отдельным обобщенным координатам i ($i = 1 \div N$), могут быть определены по зависимости

$$B_n^{(i)} = B_{n-1}^{(i)} + (F_n^{(i)} - F_{n-1}^{(i)}) P_n^{(i)} \cdot 2k,$$

где $F_n^{(i)}$ — i-й элемент вектора упругих сил $\{F_n\} = -[C]\{x_n\}$, определенного для n-го момента времени;

$F_{n-1}^{(i)}$ — то же, для $n-1$-го момента времени;

$P_n^{(i)}$ — скалярный оператор, принимающий значения 0, 1, —1;

k — относительное демпфирование (в долях от критического), заданное для упругой системы, характеризуемой матрицей жесткости $[C]$.

Текущее значение $P_n^{(i)}$, определяемое на каждом шаге интегрирования, зависит от значения параметра $A_n = \dfrac{(F_n^{(i)} - F_{n-1}^{(i)})}{(F_{n-1}^{(i)} - F_{n-2}^{(i)})}$:

$$P_n^{(i)} = \begin{cases} 1 \text{ при } A_n > 1 \text{ и } A_n = \pm\infty; \\ -1 \text{ при } A_n < 1; \\ 0 \text{ при } A_n = 1. \end{cases}$$

При $A_n < 0$ или $F_n^{(i)} - F_{n-1}^{(i)} = 0$ реализуется условие $B_n^{(i)} = 0$.

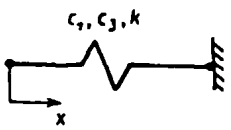
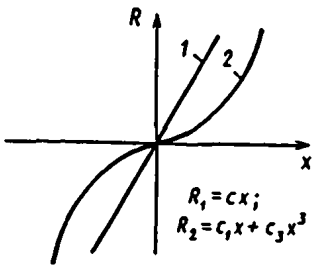
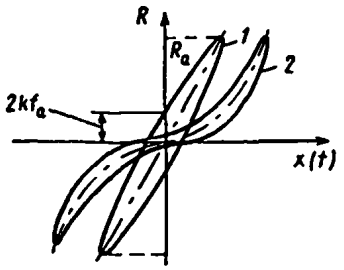
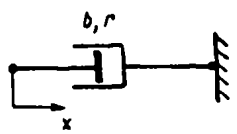
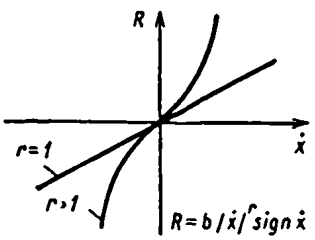
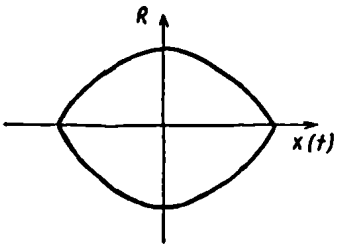
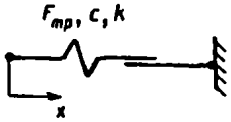
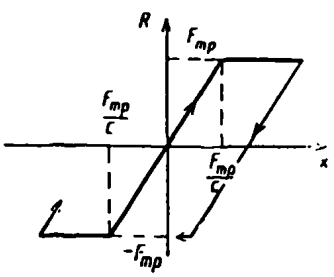
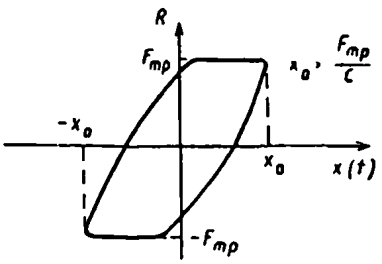
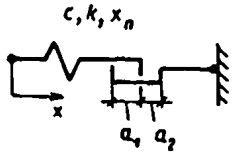
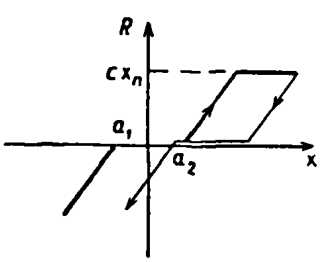
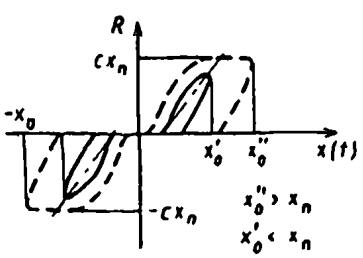
Диссипативные составляющие усилий, возникающие в дополнительных, в том числе в нелинейных, связях динамической системы, упругие характеристики которых не учитываются матрицей $[C]$, определяются аналогичным способом, причем для каждой из них может быть задано свое относительное демпфирование k. Диссипативные усилия в связях учитываются при определении вектора $[R]$.

3.7. Вектор реактивных сил $\{R_n\}$, действующих в направлении обобщенных координат системы в момент времени n, формируется с учетом усилий, возникающих в дополнительных связях системы. Эти связи обычно представляют собой расчетные модели различных элементов конструкции, характеристики которых не могут быть определены с помощью линейной зависимости. К таким элементам относятся демпферы, соединения с трением, нелинейно-упругие и упруго-пластические связи, соединения, имеющие зазоры или люфты, антисейсмические амортизаторы.

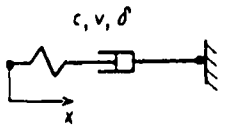
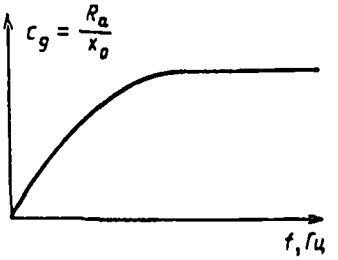
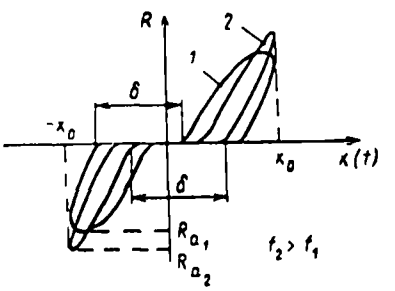
Схемы моделей некоторых нелинейных элементов, которые могут быть включены в расчетную систему оборудования или трубопроводов, приведены в табл. 2.

Таблица 2

Типы нелинейных элементов расчетной модели

Название и схема элемента	Диаграмма статического нагружения	Диаграмма циклического нагружения $x(t)=x_0 \sin(2\pi f t)$
Упругий элемент c_1, c_3, k 		
Демпфер b, r 		
Элемент сухого трения F_{mp}, c, k 		
Упругопластический упор с зазорами c, k, x_n 		

Продолжение табл. 2

Название и схема элемента	Диаграмма статического нагружения	Диаграмма циклического нагружения $x(t) = x_0 \sin(2\pi f t)$
Антисейсмический амортизатор 		

Примечание. v — скорость релаксации усилия в амортизаторе; δ — технологический и функциональный люфт; c — жесткость.

4. КОМПЛЕКС ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ ПРОГРАММ ДЛЯ РАСЧЕТА НА СЕЙСМОСТОЙКОСТЬ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ АЭУ

4.1. При проведении поверочных расчетов на сейсмостойкость оборудования и трубопроводов АЭУ рекомендуется использовать специализированные программы, разработанные в НПО ЦКТИ. Программы составлены на языке Фортран-IV применительно к ЕС ЭВМ в соответствии с требованиями настоящего РТМ.

4.2. Программа СПЕКТР выполняет расчет спектров ответа по заданным акселерограммам. В качестве исходных данных для расчета задаются значения собственных частот осцилляторов, коэффициентов демпфирования и оцифровка акселерограммы.

4.3. Программа СЕЙСМ-184 выполняет расчет вынужденных колебаний по МДА плоских стержневых систем с нелинейными характеристиками на однокомпонентное кинематическое воздействие, задаваемое акселерограммой. В результате расчета по программе СЕЙСМ-184 вычисляются максимальные внутренние усилия и деформации в элементах, а также могут быть определены параметры движения узлов расчетной модели и их максимальные абсолютные ускорения.

4.4. Программа ЛСМ-84 выполняет расчет внутренних усилий в упругих связях плоских стержневых линейных систем по линейно-спектральному методу.

4.5. Программа СЕЙСМ-282 выполняет расчет на сейсмостойкость по МДА пространственных стержневых систем с нелинейными характеристиками при трехкомпонентном кинематическом воздействии, задаваемом акселерограммами. Одновременно с расчетом вынужденных колебаний может быть проведен статический расчет на весовые и сосредоточенные нагрузки.

4.6. Программа СТАДИАС выполняет расчет на сейсмостойкость по ЛСМ пространственных стержневых линейно-упругих систем при трехкомпонентном сейсмическом воздействии, задаваемом спектрами ответа. Одновременно с расчетом на сейсмические нагрузки может быть проведен статический расчет на весовые и сосредоточенные нагрузки.

4.7. Программа EAS-82 выполняет поверочный расчет на прочность трубопроводных систем АЭС при сейсмических и эксплуатационных нагрузках. Расчет на сейсмостойкость проводится по линейно-спектральному методу. При расчете определяются внутренние усилия, приведенные напряжения и перемещения в трубопроводах, а также нагрузки на оборудование и усилия в опорах.

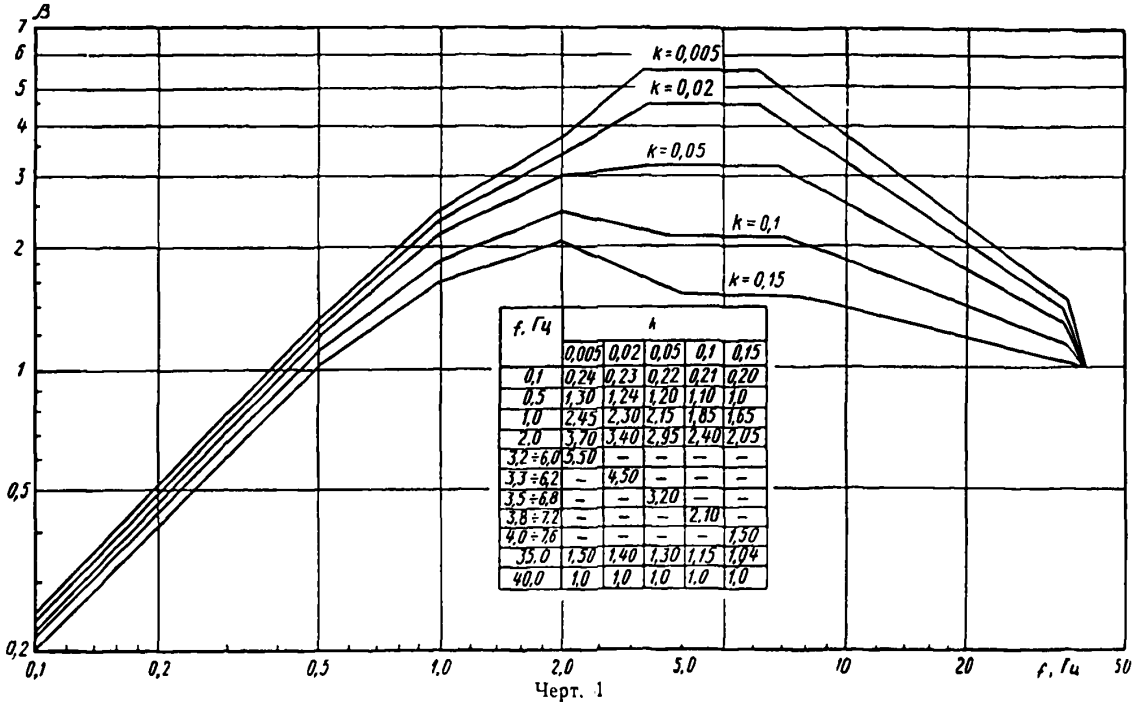
ПРИЛОЖЕНИЕ 3
Рекомендуемое

СИНТЕЗИРОВАННАЯ МОДЕЛЬ СЕЙСМИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

1. При отсутствии характеристик сейсмического воздействия по разделу 2 анализ сейсмостойкости энергооборудования рекомендуется проводить с использованием синтезированной модели сейсмического воздействия СА-482.

2. Синтезированная модель сейсмического воздействия СА-482 состоит из синтезированной акселерограммы и соответствующих ей обобщенных безразмерных спектров коэффициента динамичности (СКД).

Обобщенные СКД синтезированной модели сейсмического воздействия СА-482

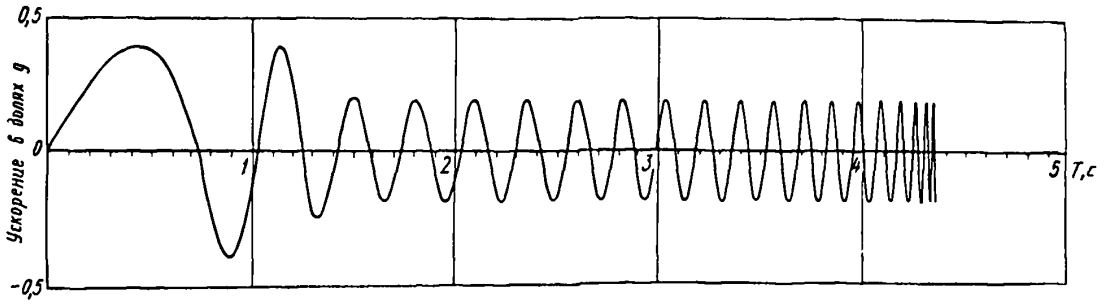


f, Гц	k				
	0,005	0,02	0,05	0,1	0,15
0,1	0,24	0,23	0,22	0,21	0,20
0,5	1,30	1,24	1,20	1,10	1,0
1,0	2,45	2,30	2,15	1,85	1,65
2,0	3,70	3,40	2,95	2,40	2,05
3,2÷6,0	5,50	—	—	—	—
3,3÷6,2	—	4,50	—	—	—
3,5÷6,8	—	—	3,20	—	—
3,8÷7,2	—	—	—	2,10	—
4,0÷7,6	—	—	—	—	1,50
35,0	1,30	1,40	1,30	1,15	1,04
40,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0

Черт. 1

3. Обобщенные СКД построены на основе статистического анализа и обработки более 100 наиболее представительных аналоговых акселерограмм, их спектров ответа, а также нормативных и обобщенных спектров ответа. Предварительно были определены сглаженные границы экстремальных значений СКД для относительного демпфирования $k = 0{,}05$ и в их диапазоне получены кривые вероятностных уровней СКД. В качестве базового СКД ($k = 0{,}05$) принята спектральная кривая с вероятностью превышения значений равной 0,2. Обобщенные СКД для других значений k (черт. 1) получены по спектрам ответа синтезированной акселерограммы СА-482.

Синтезированная акселерограмма СА-482



Черт. 2

4. Синтезированная акселерограмма СА-482 представляет собой псевдогармонический процесс с непрерывно возрастающей по определенному закону частотой и переменной амплитудой (черт. 2).

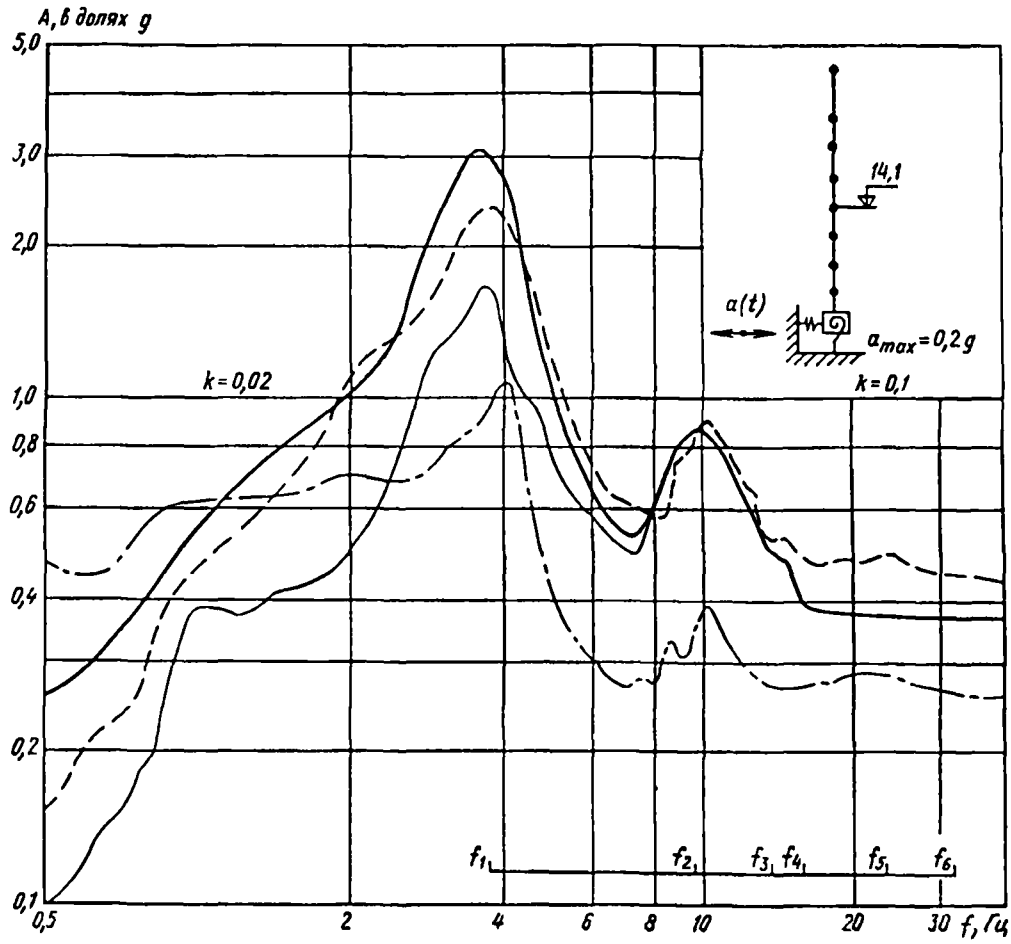
Построение СА-482 проводили с учетом выполнения двух основных условий:

совпадения спектра коэффициента динамичности СА-482 при $k=0,05$ с базовым обобщенным СКД;

равенства отношения максимумов спектров ответа величине 1,4 при значениях k, равных 0,02 и 0,05.

5. Оцифровка СА-482, приведенная к уровню максимального ускорения $0,4g$, что соответствует интенсивности сейсмического воздействия 9 баллов по шкале MSK-64, дана в таблице. При использовании СА-482 в качестве вертикальной составляющей сейсмического воздействия значения ее ускорений должны быть уменьшены путем умножения на коэффициент 0,67.

Поэтажные спектры ответа на отметке 14,1 м здания реактора



——— — СА-482; — — — — Эль-Центро; – · – · – Бухарест; ——— — Газли

Черт. 3

6. С помощью СА-482 проводят расчеты конструкций и сооружений, установленных на грунте. После определения поэтажных акселерограмм и спектров ответа допускается выполнять расчеты энергооборудования и трубопроводов, размещенных на отметках сооружения.

7. На черт. 3 для сравнения показаны поэтажные спектры ответа на отметке 14,1 м оболочки безопасности АЭС с реактором ВВЭР-440, полученные из расчетов на аналоговые акселерограммы Эль-Центро (США, N — S, 1940 г.), Бухарест (N — S, 1977 г.), Газли (СССР, N — S, 1976 г.), а также на акселерограмму СА-482.

8. Параметры реакции конструкции при расчете на СА-482 в среднем на 5—30% превышают данные, полученные с помощью аналоговых акселерограмм. СА-482 пригодна для динамического анализа сейсмостойкости как линейных, так и нелинейных систем.

9. Синтезированная акселерограмма СА-482 по сравнению с аналоговыми акселерограммами имеет значительно меньшую продолжительность (около 4,35 с) и обобщает в себе основные свойства и особенности реальных сейсмических воздействий, влияющие на величину динамической реакции энергетического оборудования. Использование СА-482 вместо набора аналоговых акселерограмм позволяет в десятки раз сократить трудоемкость и время счета на ЭВМ при обоснованиях сейсмостойкости, обеспечивая приемлемый запас расчета.

Таблица

Оцифровка синтезированной акселерограммы СА-482

*ЧИСЛО ЗНАЧЕНИЙ ОЦИФРОВКИ NT= 872
*ШАГ ОЦИФРОВКИ АКСЕЛЕРОГРАММЫ DT= 0.00500 СЕК.
*ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТЬ ВОЗДЕЙСТВИЯ TT= 4.355 СЕК.

0.0	0.0063	0.0126	0.0189	0.0253	0.0316	0.0380	0.0444	0.0507	0.0571
0.0635	0.0699	0.0762	0.0826	0.0890	0.0953	0.1017	0.1080	0.1143	0.1207
0.1270	0.1332	0.1395	0.1457	0.1519	0.1581	0.1643	0.1704	0.1765	0.1826
0.1886	0.1946	0.2006	0.2065	0.2123	0.2182	0.2239	0.2296	0.2353	0.2409
0.2465	0.2520	0.2574	0.2627	0.2680	0.2733	0.2784	0.2835	0.2885	0.2935
0.2984	0.3031	0.3077	0.3123	0.3168	0.3213	0.3256	0.3299	0.3339	0.3379
0.3418	0.3456	0.3493	0.3529	0.3564	0.3598	0.3630	0.3661	0.3691	0.3720
0.3748	0.3774	0.3799	0.3822	0.3844	0.3865	0.3885	0.3903	0.3919	0.3934
0.3948	0.3960	0.3971	0.3980	0.3987	0.3993	0.3997	0.4000	0.4001	0.4000
0.3998	0.3994	0.3988	0.3980	0.3971	0.3959	0.3946	0.3931	0.3914	0.3896
0.3875	0.3852	0.3828	0.3801	0.3772	0.3742	0.3709	0.3674	0.3637	0.3598
0.3557	0.3513	0.3468	0.3420	0.3370	0.3317	0.3262	0.3205	0.3146	0.3084
0.3020	0.2953	0.2884	0.2812	0.2738	0.2661	0.2582	0.2501	0.2415	0.2327
0.2237	0.2143	0.2047	0.1947	0.1844	0.1738	0.1629	0.1518	0.1399	0.1278
0.1154	0.1025	0.0893	0.0756	0.0615	0.0470	0.0321	0.0167	0.0010	-0.0152
-0.0318	-0.0487	-0.0660	-0.0837	-0.1016	-0.1196	-0.1377	-0.1557	-0.1736	-0.1912
-0.2085	-0.2254	-0.2418	-0.2576	-0.2729	-0.2876	-0.3015	-0.3147	-0.3272	-0.3388
-0.3495	-0.3593	-0.3681	-0.3760	-0.3827	-0.3885	-0.3931	-0.3965	-0.3989	-0.4000
-0.3999	-0.3986	-0.3961	-0.3923	-0.3873	-0.3810	-0.3735	-0.3647	-0.3548	-0.3436
-0.3313	-0.3178	-0.3032	-0.2875	-0.2708	-0.2530	-0.2343	-0.2147	-0.1942	-0.1730
-0.1510	-0.1283	-0.1051	-0.0814	-0.0572	-0.0327	-0.0079	0.0171	0.0420	0.0670

Продолжение

0.0919	0.1165	0.1408	0.1646	0.1879	0.2105	0.2324	0.2534	0.2733	0.2922
0.3099	0.3263	0.3412	0.3547	0.3666	0.3768	0.3852	0.3919	0.3965	0.3993
0.4001	0.3988	0.3955	0.3901	0.3826	0.3730	0.3613	0.3476	0.3318	0.3141
0.2946	0.2732	0.2501	0.2254	0.1992	0.1716	0.1429	0.1121	0.0798	0.0483
0.0176	-0.0128	-0.0483	-0.0674	-0.0931	-0.1171	-0.1395	-0.1602	-0.1790	-0.1958
-0.2107	-0.2235	-0.2343	-0.2429	-0.2494	-0.2537	-0.2560	-0.2561	-0.2542	-0.2503
-0.2444	-0.2367	-0.2272	-0.2160	-0.2033	-0.1892	-0.1766	-0.1625	-0.1470	-0.1303
-0.1125	-0.0938	-0.0743	-0.0542	-0.0338	-0.0132	0.0075	0.0280	0.0481	0.0677
0.0865	0.1049	0.1214	0.1371	0.1514	0.1643	0.1756	0.1851	0.1929	0.1988
0.2028	0.2049	0.2050	0.2032	0.1995	0.1938	0.1863	0.1771	0.1663	0.1538
0.1400	0.1248	0.1085	0.0913	0.0732	0.0545	0.0354	0.0160	-0.0034	-0.0228
-0.0418	-0.0603	-0.0783	-0.0956	-0.1119	-0.1272	-0.1411	-0.1537	-0.1647	-0.1741
-0.1816	-0.1874	-0.1912	-0.1931	-0.1929	-0.1908	-0.1867	-0.1806	-0.1727	-0.1629
-0.1514	-0.1384	-0.1238	-0.1079	-0.0908	-0.0728	-0.0540	-0.0345	-0.0147	0.0053
0.0253	0.0451	0.0644	0.0830	0.1007	0.1174	0.1326	0.1467	0.1591	0.1697
0.1785	0.1853	0.1900	0.1927	0.1932	0.1915	0.1877	0.1817	0.1737	0.1637
0.1519	0.1382	0.1230	0.1064	0.0885	0.0696	0.0498	0.0295	0.0087	-0.0121
0.0329	-0.0533	-0.0731	-0.0920	-0.1099	-0.1266	-0.1417	-0.1552	-0.1668	-0.1765
-0.1848	-0.1894	-0.1925	-0.1932	-0.1916	-0.1877	-0.1814	-0.1732	-0.1624	-0.1497
-0.1352	-0.1191	-0.1014	-0.0824	-0.0623	-0.0415	-0.0201	0.0018	0.0233	0.0447
0.0656	0.0857	0.1047	0.1224	0.1386	0.1529	0.1654	0.1757	0.1837	0.1894
0.1923	0.1932	0.1913	0.1868	0.1799	0.1706	0.1590	0.1453	0.1296	0.1121
0.0931	0.0728	0.0514	0.0294	0.0069	-0.0157	-0.0382	-0.0601	-0.0812	-0.1013
-0.1200	-0.1378	-0.1521	-0.1652	-0.1759	-0.1841	-0.1896	-0.1929	-0.1930	-0.1905
-0.1852	-0.1773	-0.1668	-0.1539	-0.1387	-0.1214	-0.1024	-0.0819	-0.0601	-0.0373
-0.0148	0.0095	0.0329	0.0559	0.0781	0.0991	0.1187	0.1366	0.1523	0.1656
0.1768	0.1851	0.1905	0.1931	0.1926	0.1892	0.1828	0.1735	0.1616	0.1470
0.1301	0.1112	0.0904	0.0682	0.0448	0.0207	-0.0038	-0.0282	-0.0523	-0.0759
-0.0976	-0.1181	-0.1366	-0.1530	-0.1669	-0.1788	-0.1862	-0.1913	-0.1932	-0.1919
-0.1874	-0.1790	-0.1689	-0.1552	-0.1388	-0.1201	-0.0993	-0.0767	-0.0527	-0.0270
-0.0020	0.0231	0.0483	0.0726	0.0957	0.1172	0.1366	0.1536	0.1679	0.1792
0.1872	0.1928	0.1932	0.1909	0.1852	0.1760	0.1636	0.1482	0.1299	0.1093
0.0865	0.0621	0.0365	0.0101	-0.0164	-0.0428	-0.0683	-0.0926	-0.1152	-0.1356

Продолжение

-0.1534	-0.1682	-0.1798	-0.1879	-0.1924	-0.1931	-0.1899	-0.1836	-0.1724	-0.1584
-0.1412	-0.1211	-0.0985	-0.0739	-0.0478	-0.0206	0.0071	0.0345	0.0615	0.0872
0.1111	0.1327	0.1516	0.1674	0.1796	0.1880	0.1925	0.1929	0.1892	0.1813
0.1696	0.1541	0.1353	0.1135	0.0892	0.0628	0.0350	0.0064	-0.0224	-0.0508
-0.0781	-0.1036	-0.1269	-0.1474	-0.1645	-0.1779	-0.1873	-0.1923	-0.1930	-0.1891
-0.1508	-0.1663	-0.1518	-0.1317	-0.1084	-0.0826	-0.0546	-0.0256	0.0048	0.0345
0.0636	0.0912	0.1167	0.1393	0.1586	0.1739	0.1852	0.1915	0.1932	0.1901
0.1821	0.1695	0.1526	0.1317	0.1074	0.0803	0.0511	0.0205	-0.0107	-0.0418
-0.0717	-0.0999	-0.1254	-0.1477	-0.1660	-0.1800	-0.1891	-0.1931	-0.1918	-0.1853
-0.1737	-0.1573	-0.1365	-0.1119	-0.0841	-0.0539	-0.0221	0.0106	0.0427	0.0738
0.1029	0.1291	0.1516	0.1698	0.1838	0.1929	0.1932	0.1898	0.1808	0.1664
0.1469	0.1230	0.0953	0.0647	0.0320	-0.0017	-0.0355	-0.0682	-0.0989	-0.1266
-0.1584	-0.1693	-0.1832	-0.1912	-0.1931	-0.1889	-0.1785	-0.1625	-0.1409	-0.1148
-0.0648	-0.0328	-0.0174	0.0179	0.0526	0.0857	0.1159	0.1423	0.1639	0.1798
0.1899	0.1933	0.1899	0.1688	0.1637	0.1416	0.1144	0.0831	0.0488	0.0126
-0.0241	-0.0608	-0.0938	-0.1243	-0.1503	-0.1708	-0.1850	-0.1923	-0.1924	-0.1853
-0.1711	-0.1504	-0.1238	-0.0925	-0.0574	-0.0201	0.0181	0.0557	0.0912	0.1232
0.1503	0.1715	0.1859	0.1927	0.1917	0.1829	0.1665	0.1432	0.1139	0.0797
0.0422	0.0027	-0.0378	-0.0752	-0.1103	-0.1407	-0.1651	-0.1820	-0.1917	-0.1926
-0.1850	-0.1691	-0.1456	-0.1155	-0.0800	-0.0449	0.0083	0.0415	0.0809	0.1167
0.1471	0.1707	0.1863	0.1938	0.1905	0.1769	0.1585	0.1304	0.0958	0.0564
0.0141	-0.0296	-0.0728	-0.1091	-0.1428	-0.1678	-0.1851	-0.1929	-0.1906	-0.1785
-0.1509	-0.1270	-0.0983	-0.0687	-0.0343	0.0405	0.0832	0.1214	0.1531	0.1765
0.1900	0.1938	0.1871	0.1666	0.1386	0.1026	0.0625	0.0145	-0.0319	-0.0769
-0.1175	-0.1512	-0.1759	-0.1921	-0.1928	-0.1837	-0.1633	-0.1329	-0.0938	-0.0489
-0.0007	0.0477	0.0931	0.1328	0.1639	0.1845	0.1931	0.1889	0.1721	0.1438
0.1057	0.0601	0.0101	-0.0418	-0.0896	-0.1320	-0.1651	-0.1861	-0.1932	-0.1856
-0.1635	-0.1282	-0.0823	-0.0293	0.0265	0.0806	0.1282	0.1653	0.1874	0.1929
0.1907	0.1512	0.1069	0.0517	-0.0093	-0.0699	-0.1238	-0.1651	-0.1889	-0.1918
-0.1709	-0.1338	-0.0777	-0.0117	0.0565	0.1184	0.1653	0.1904	0.1892	0.1686
0.1079	0.0378	-0.0393	-0.1112	-0.1655	-0.1919	-0.1840	-0.1415	-0.0786	0.0159
0.1009	0.1653	0.1929	0.1745	0.1113	0.0168	-0.0850	-0.1643	-0.1932	-0.1577
-0.0638	0.0583	0.1681	0.1922	0.1285	-0.0098	-0.1486	-0.1897	-0.0764	0.1128
0.1887	0.0								

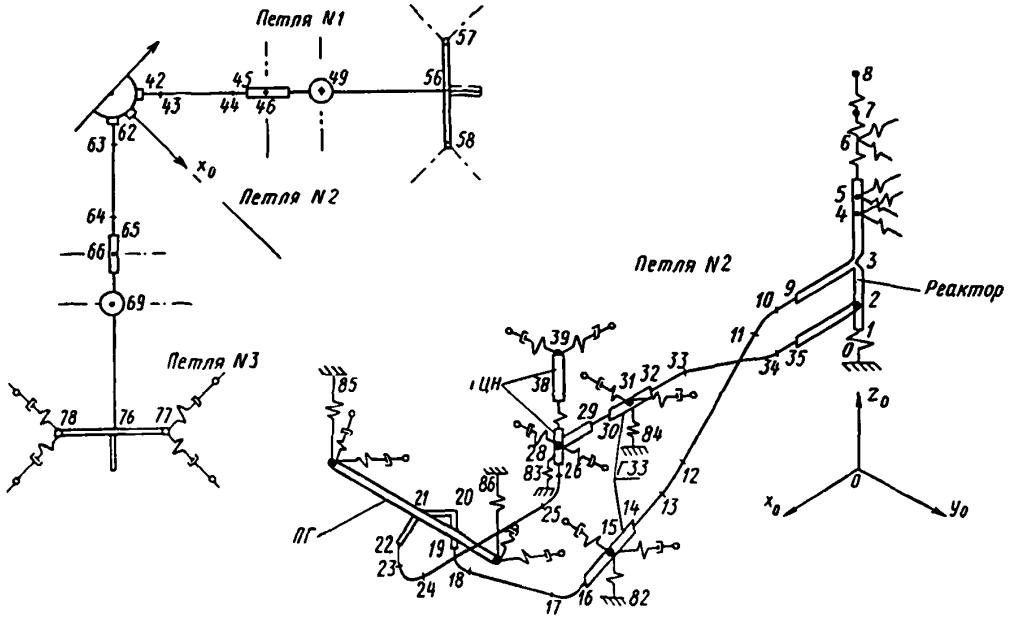
ПРИЛОЖЕНИЕ 4
Справочное

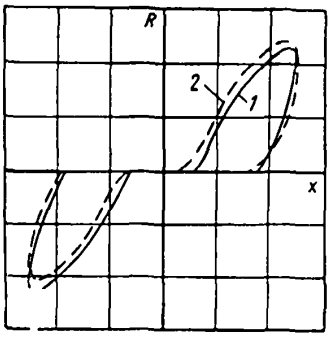
ПРИМЕРЫ РАСЧЕТА НА СЕЙСМОСТОЙКОСТЬ ОБОРУДОВАНИЯ И ТРУБОПРОВОДОВ АЭС

1. РАСЧЕТ ГЛАВНОГО ЦИРКУЛЯЦИОННОГО КОНТУРА (ГЦК) АЭС С ВОДО-ВОДЯНЫМ РЕАКТОРОМ

1.1. В настоящем подразделе рассматривается порядок проведения расчета на сейсмостойкость ГЦК по методу динамического анализа (МДА).

Расчетная модель I контура АЭС с ВВЭР





Динамические характеристики амортизаторов при $x=x_0 \sin(2\pi/t)$: расчетная (*1*) и экспериментальная (*2*)

Черт. 1

1.2. В расчете определяются напряжения в сечениях главного циркуляционного трубопровода (ГЦТ) Ду 500, нагрузки на опорные элементы реактора, парогенератора (ПГ), главного циркуляционного насоса (ГЦН), а также нагрузки на главные запорные задвижки (ГЗЗ) и гидроамортизаторы.

1.3. Расчетная стержневая модель ГЦК, показанная на черт. 1, включает в себя реактор с верхним блоком и петли ГЦТ. В силу симметрии циркуляционного контура в расчетной модели представлены три петли вместо шести. Массовые и упругие характеристики реактора и его опорных элементов приняты равными половине от их фактических значений. Одновременно исключен поворот реактора относительно вертикальной оси.

1.4. Антисейсмические гидроамортизаторы ГЦК представлены в расчетной модели специальными элементами, имеющими расчетную диаграмму «усилие — деформация», близко совпадающую с экспериментальной диаграммой для гидроамортизаторов (см. черт. 1).

1.5. В расчетной модели ГЦК подробно рассматривается только одна петля циркуляционного трубопровода (петля № 2), в схеме которой полностью отражены основные геометрические и механические характеристики трубопроводов и оборудования. Две другие петли представлены в упрощенном виде и предназначены, главным образом, для оценки динамического взаимодействия основных элементов ГЦК при колебаниях.

1.6. ПГ и ГЦН представлены в расчетной модели системами жестких стержней, отражающими основные геометрические размеры и конфигурацию оборудования с учетом расположения опор и гидроамортизаторов.

1.7. Принятая в качестве расчетной трехкомпонентная акселерограмма на отметке размещения ГЦК (отметка 14,1 м) получена путем расчета сооружения АЭС на сейсмическое воздействие, заданное синтезированной акселерограммой СА-482, приведенной к интенсивности 8 баллов по шкале MSK-64 ($a_{max}=0{,}2g$).

1.8. Диссипация внутренней упругой энергии при колебаниях системы ГЦК учитывалась по методике гистерезисного сопротивления. Относительное демпфирование в системе ГЦК принималось равным 0,02.

1.9. Расчет на сейсмостойкость ГЦК выполнялся по программе СЕЙСМ-282 (НПО ЦКТИ). Основные результаты расчета приведены в табл. 1, 2 и 3.

Таблица 1

Значения внутренних усилий в опорах оборудования ГЦК от весовых и сейсмических нагрузок

Номер опор	Опорные конструкции ГЦК	Компоненты усилий					
		Q_x, кН	Q_y, кН	Q_z, кН	M_x, кН·м	M_y, кН·м	M_z, кН·м
1	Опора реактора (сечение 0)	2600	1200	7600	420	9200	—
		2900	2100	10 000	—	—	—
2	Опора ГЦН (сечение 83)	—	—	1100	—	—	—
3	Опора ГЗЗ (сечение 82)	—	—	73	—	—	—
4	Подвески ПГ:						
	сечение 85	—	—	2400	—	—	—
	сечение 86	—	—	2300	—	—	—

Примечания:
1. Для опоры реактора даются две группы нагрузок: первая группа соответствует состоянию с максимальным моментом относительно осей x и y; вторая группа включает в себя максимальные значения нагрузок в направлениях осей x, y, z.
2. Усилия получены без учета нагрузок от самокомпенсации и натягов в ГЦТ.

Таблица 2

Изгибные напряжения в сечениях циркуляционного трубопровода, МПа

Номер сечения	Статика	Статика и динамика	Номер сечения	Статика	Статика и динамика
10	16	23	24	7	15
11	9	14	25	5	11
12	6	11	26	6	11
13	9	14	27	9	15
14	12	21	30	8	29
17	7	11	33	8	16
18	9	20	34	4	16
19	11	20	35	9	26
23	10	20			

Таблица 3

Максимальные усилия в гидроамортизаторах ГЦК

Место установки амортизатора	Номер узла	Величина усилия, кН
ГЗЗ горячей нитки ГЦТ	15	124
Корпус ГЦН	28	254
Электродвигатель ГЦН	39	377
Парогенератор	40, 41	1567, 1500
ГЗЗ холодной нитки ГЦТ	31	140

1.10. Общие изгибные и мембранные напряжения, возникающие в трубопроводе Ду 500 от весовых и сейсмических нагрузок, как видно из табл. 2, имеют низкий уровень, они малы (по сравнению с напряжениями от внутреннего давления) и практически не влияют на величины приведенных напряжений.

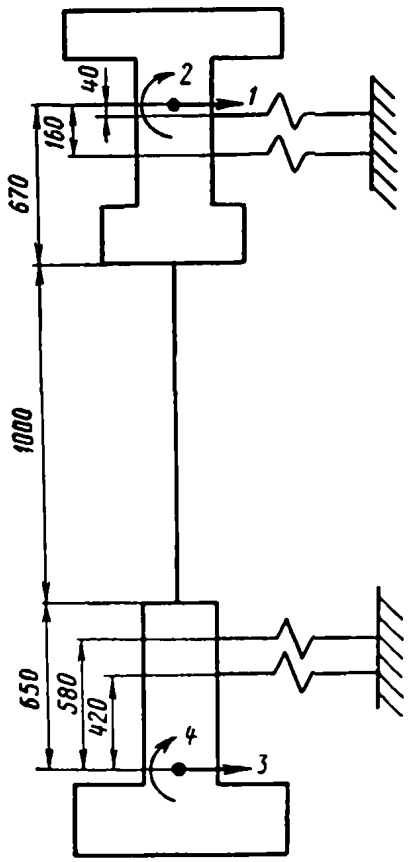
1.11. По полученным в расчете ГЦК усилиям в опорах реактора, ПГ, ГЦН, а также нагрузкам на гидроамортизаторы может быть выполнена оценка прочности узлов и элементов перечисленных конструкций.

1.12. Динамический анализ ГЦК позволяет получить усилия и напряжения в основных элементах контура с учетом реальных особенностей динамического взаимодействия оборудования и трубопроводов при колебаниях, вызванных сейсмическим воздействием. Данная методика дает возможность применить комплексный подход при оценке сейсмостойкости основного оборудования I контура и получить необходимые данные для детального рассмотрения отдельных элементов установки.

2. РАСЧЕТ НА СЕЙСМОСТОЙКОСТЬ ВНУТРЕННИХ ЭЛЕМЕНТОВ ГЦН

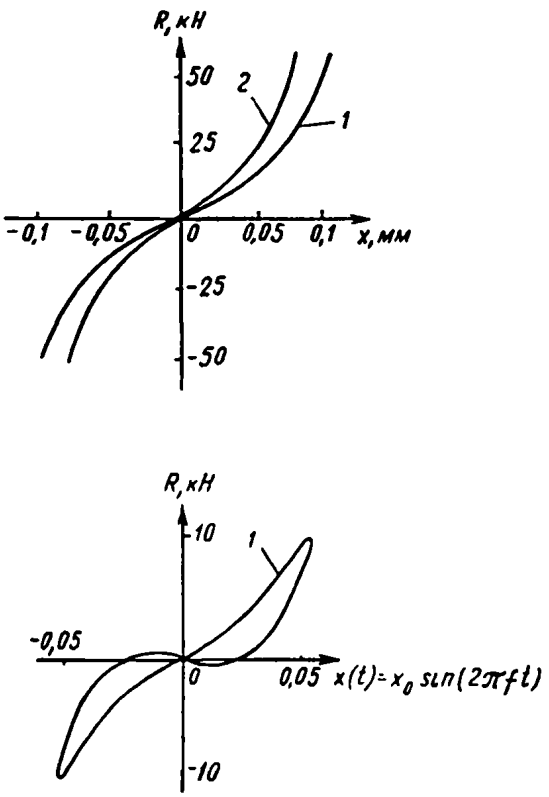
2.1. В настоящем подразделе рассматривается порядок выполнения расчета на сейсмостойкость выемной части ГЦН по методу динамического анализа.

Расчетная модель выемной части ГЦН



Черт. 2

Диаграмма «усилие — деформация» для подшипников ГЦН



1 — верхний подшипник; *2* — нижний подшипник

Черт. 3

2.2. В расчете определяются напряжения в роторе ГЦН, нагрузки на радиальные подшипники и смещения рабочего колеса насоса относительно лабиринтного уплотнения при сейсмическом воздействии силой 8 баллов по шкале MSK-64.

2.3. Сейсмическое воздействие на выемную часть ГЦН задано ответной акселерограммой движения корпуса насоса, полученной в результате расчета ГЦК.

2.4. Расчетная модель выемной части ГЦН показана на черт. 2. Ротор представлен упругим стержнем, соединенным с двумя жесткими дисками, имитирующими опорные части вала (тормозной диск и гребень упорного подшипника в верхней части ротора и рабочее колесо в нижней части). Упругие свойства радиальных подшипников ГЦН учтены с помощью нелинейных связей (черт. 3), введенных в расчетную модель между жесткими дисками и основанием (корпусом ГЦН). Расчетные зависимости «усилие — деформация» для нелинейных связей подобраны в соответствии с экспериментальными данными.

2.5. Рассеяние энергии в динамической системе учитывается по методике гистерезисного сопротивления при значениях относительного демпфирования 0,005 для вала ротора (стержня) и 0,1 для смазочного слоя подшипников (нелинейные связи).

2.6. Расчет проводился по программе СЕЙСМ-184 (НПО ЦКТИ). Основные результаты расчета приведены в табл. 4.

Таблица 4

Максимальные усилия и смещения в выемной части ГЦН при сейсмическом воздействии

Расчетный параметр	Верхний подшипник		Нижний подшипник		Вал ротора ГЦН	Рабочее колесо
	Верхний вкладыш	Нижний вкладыш	Верхний вкладыш	Нижний вкладыш		
Радиальная нагрузка, кН	8,56	2,88	3,12	14,65	—	—
Удельное давление, МПа	0,39 / 7,0 *	0,13 / 7,0	0,09 / 7,0	0,42 / 7,0	—	—
Изгибающий момент, кН·м	—	—	—	—	25,3	—
Напряжение, МПа	—	—	—	—	15 / 210	—
Относительное смещение, мм:						
в блоке уплотнений	—	—	—	—	0,25 / 0,85	—
в лабиринтовом уплотнении	—	—	—	—	—	0,3 / 0,4

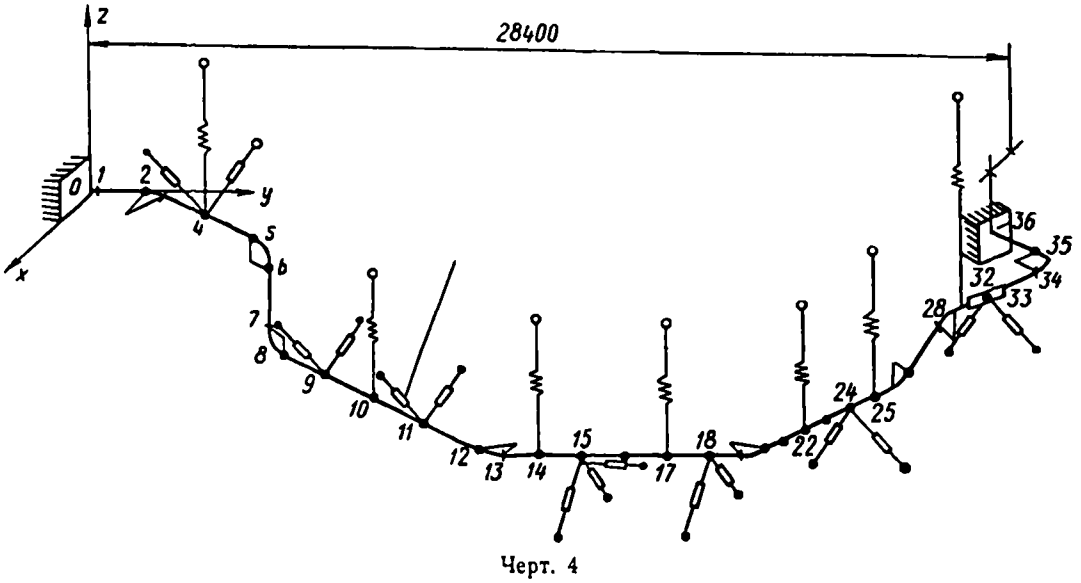
* В знаменателе приведены допускаемые значения параметров.

2.7. Как видно из табл. 4, все расчетные параметры выемной части ГЦН при оценке сейсмостойкости ее элементов не превышают допустимых значений. Сейсмостойкость элементов выемной части ГЦН обеспечивается.

3. РАСЧЕТ ТРУБОПРОВОДА ПИТАТЕЛЬНОЙ ВОДЫ

3.1. В настоящем подразделе рассматривается порядок выполнения расчетов на сейсмостойкость трубопроводной системы по трем методам: линейно-спектральному (ЛСМ), динамического анализа (МДА) и статическому.

Расчетная модель трубопровода Ду 250



Черт. 4

3.2. Целью данных расчетов является сопоставительный анализ результатов, получаемых с помощью трех различных методов, а также расчетное обоснование конструктивных мероприятий, направленных на обеспечение сейсмостойкости трубопровода.

3.3. Рассматривается участок трубопровода питательной воды Ду 250, размещенный между парогенератором и проходкой в стене реакторного отделения.

Расчетная модель трубопровода, представляющая собой пространственную стержневую динамическую систему, показана на черт. 4. Масса трубопровода сосредоточена в узловых точках стержневой системы. При назначении обобщенных координат использовался дополнительный анализ системы для ограничения уровня внешних частот. Число степеней свободы принято равным 42.

3.4. Сейсмическое воздействие на трубопровод при расчете по ЛСМ задано спектрами ответа для трех взаимно перпендикулярных направлений при значении относительного демпфирования 0,02. Данные поэтажные спектры получены по ответным акселерограммам на отметке 14,1 м здания АЭС, которые использовались в примере расчета подраздела 1.

3.5. Расчет трубопровода Ду 250 на сейсмостойкость по ЛСМ проводился по программе СТАДИАС (НПО ЦКТИ). В данной программе реализован векторный способ определения результирующих спектральных ускорений.

3.6. Расчет по МДА проводился по программе СЕЙСМ-282 (НПО ЦКТИ) при воздействии, заданном поэтажными акселерограммами для отметки 14,1 м. Значение относительного демпфирования для динамической системы трубопровода Ду 250 принималось равным 0,02.

3.7. Расчет трубопровода по статическому методу проводился с помощью программы СТАДИАС при последовательном статическом загружении трубопровода весовой нагрузкой в трех взаимно перпендикулярных плоскостях. Разгружающее действие компенсационных пружинных подвесок при нагружении трубопровода в вертикальной плоскости не учитывалось.

3.8. Результаты расчета напряженного состояния трубопровода при сейсмическом воздействии приведены в табл. 5. В целях лучшего сопоставления результатов расчетов напряжения от внутреннего давления в трубопроводе не учитывались.

Таблица 5

Максимальные общие изгибные напряжения в трубопроводе Ду 250, полученные из расчетов на сейсмостойкость, МПа

Номер сечения	Статический метод ($k_б$=0,5; $k_в$=1,7; $k_и$=1,5)				ЛСМ	МДА	Расчет по МДА с сейсмозащитными устройствами	
	Нагрузка по оси x	Нагрузка по оси y	Нагрузка по оси z	Результирующее значение			Демпферы	Гидроамортизаторы
1	197	62	45	212	165	230	20	33
2	35	112	18	119	84	103	7	18
3	23	68	18	74	54	62	7	11
4	73	64	11	98	92	96	28	31
5	111	79	6	136	105	121	24	35
6	59	51	7	78	63	69	16	24
7	91	72	9	116	96	118	23	37
8	76	58	5	96	82	96	18	28
9	81	78	5	113	97	105	15	20
10	41	78	7	88	77	73	18	28
11	20	86	4	88	67	68	10	18
12	26	84	5	88	72	91	15	29
13	18	55	4	58	48	61	10	18
14	15	56	3	57	64	80	11	34
15	13	23	5	27	54	62	16	35
16	15	15	5	22	49	63	13	38
17	13	46	3	46	53	75	17	36
18	20	79	5	82	60	72	16	45
19	33	104	5	111	72	78	22	44
20	25	72	2	76	51	55	17	35
21	16	105	3	105	77	86	20	41
22	40	99	10	100	81	86	17	39
23	12	84	1	85	74	93	7	27
24	20	63	5	66	66	87	22	43
25	24	37	3	44	46	63	10	32
26	25	22	3	33	35	41	15	30
27	15	13	5	20	20	23	10	19
28	19	23	3	30	34	34	22	34
29	14	18	5	23	27	27	17	25
30	19	31	5	37	44	42	26	35
31	18	35	6	40	44	39	22	31
32	17	45	2	49	46	44	16	25
33	22	64	15	69	55	58	13	18
34	54	119	35	135	89	120	10	22
35	22	110	8	112	64	97	10	13
36	34	220	28	224	109	152	43	81

В табл. 6 приведены значения низших собственных частот трубопровода (до 40 Гц), определенных в расчете по ЛСМ.

Таблица 6

Значения собственных частот трубопровода Ду 250, Гц

Номер частоты	Значение	Номер частоты	Значение
1	1,50	13	12,05
2	1,88	14	13,20
3	2,47	15	14,40
4	3,09	16	18,77
5	3,38	17	20,00
6	3,98	18	23,00
7	5,21	19	24,05
8	5,44	20	26,30
9	6,02	21	28,65
10	8,30	22	31,16
11	9,07	23	35,00
12	10,25	42	167,70 (макс.)

Таблица 7

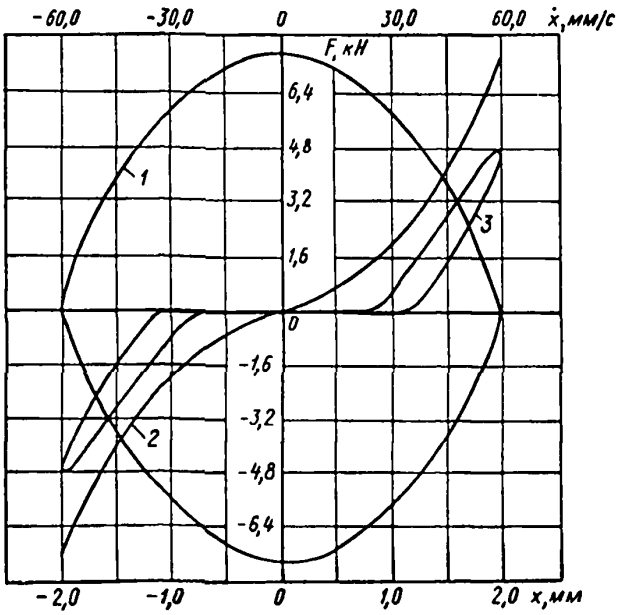
Максимальные усилия в сейсмозащитных устройствах трубопровода Ду 250

Номер узла	Количество устройств в узле	Абсолютная величина усилия, кН	
		в демпфере (вариант 1)	в гидроамортизаторе (вариант 2)
4	2	1. 2,35 2. 2,05	1. 10,00 2. 10,95
9	2	1. 2,95 2. 2,00	1. 20,20 2. 22,50
11	2	1. 2,75 2. 2,45	1. 22,50 2. 21,35
15	3	1. 1,05 2. 6,75 3. 0,60	1. 25,20 2. 32,05 3. 0,0
18	2	1. 1,40 2. 15,55	1. 35,65 2. 41,45
24	2	1. 3,45 2. 12,15	1. 31,40 2. 32,10
32	2	1. 1,00 2. 2,00	1. 25,60 2. 27,30

3.9. Расчеты, проведенные тремя различными методами, показали хорошее количественное совпадение величин напряжений в сечениях трубопровода. Отличительной особенностью расчета по МДА в данном случае является использование в качестве исходного сейсмического воздействия двух одинаковых акселерограмм для направлений горизонтальных осей x и y. Синфазность двух компонент воздействия при расчете пространственной системы по МДА приводит к завышению результатов в среднем на 10%. Поэтому расчет по МДА в данном примере дает консервативную оценку прочности по сравнению с ЛСМ. При отсутствии условий синфазности компонент воздействия расчеты по ЛСМ и МДА обычно дают близкие результаты.

Расчет по статическому методу проводился при значении коэффициента $k_{\text{п}}=1{,}5$, определенном в соответствии с низшей собственной частотой трубопровода. Результаты расчета по статическому методу дают консервативную оценку сейсмостойкости по сравнению с результатами расчета по точным методам (ЛСМ и МДА) и в то же время консервативность статического метода не является чрезмерно высокой.

Расчетные диаграммы циклического нагружения демпфера (*1*, *2*) и гидроамортизатора (*3*) при $f=5$ Гц и $x_{max}=2$ мм



Черт. 5

3.10. Максимальный уровень изгибных напряжений, полученный в трубопроводе, даже без учета напряжений, возникающих от внутреннего давления, выше допустимого. Трубопровод Ду 250 при этих условиях является несейсмостойким. Низкая несущая способность трубопровода по отношению к внешним нагрузкам объясняется, главным образом, отсутствием достаточного количества опорных связей и его большой гибкостью.

3.11. Для обеспечения сейсмостойкости трубопровода Ду 250 требуется установить сейсмозащитные устройства: гидроамортизаторы либо демпферы вязкого сопротивления.

Рассмотрим применение двух указанных типов устройств отдельно. Схемы установки гидроамортизаторов и демпферов показаны на черт. 4. Расчетные диаграммы циклического нагружения «усилие — перемещение» для гидроамортизатора и демпфера, а также «усилие — скорость» для демпфера приведены на черт. 5.

3.12. Результаты расчетов трубопровода Ду 250 с сейсмозащитными устройствами по программе СЕЙСМ-282 (НПО ЦКТИ) приведены в табл. 5 и 7.

Наибольшие приведенные напряжения в трубопроводе для двух вариантов раскрепления с помощью гидроамортизаторов и демпферов при учете напряжений, возникающих от внутреннего давления (48 МПа), соответственно равны 72,8 и 111 МПа. При допускаемых напряжениях 200 МПа сейсмостойкость трубопровода Ду 250 обеспечивается для обоих рассмотренных вариантов раскрепления.

Расчеты показали, что наибольшая эффективность снижения напряжений в трубопроводе достигается за счет применения демпферов вязкого сопротивления, при этом максимальные усилия, возникающие в демпферах, значительно меньше усилий в гидроамортизаторах.

4. РАСЧЕТ ДЕАЭРАТОРА II КОНТУРА АЭС

4.1. В настоящем подразделе рассматривается порядок проведения расчета сейсмических нагрузок по статическому методу.

В качестве рассчитываемого объекта оборудования взят один из вариантов деаэратора.

4.2. Целью расчета является определение сейсмических нагрузок на деаэратор, проверка условий его устойчивости от опрокидывания и прочности опорных конструкций.

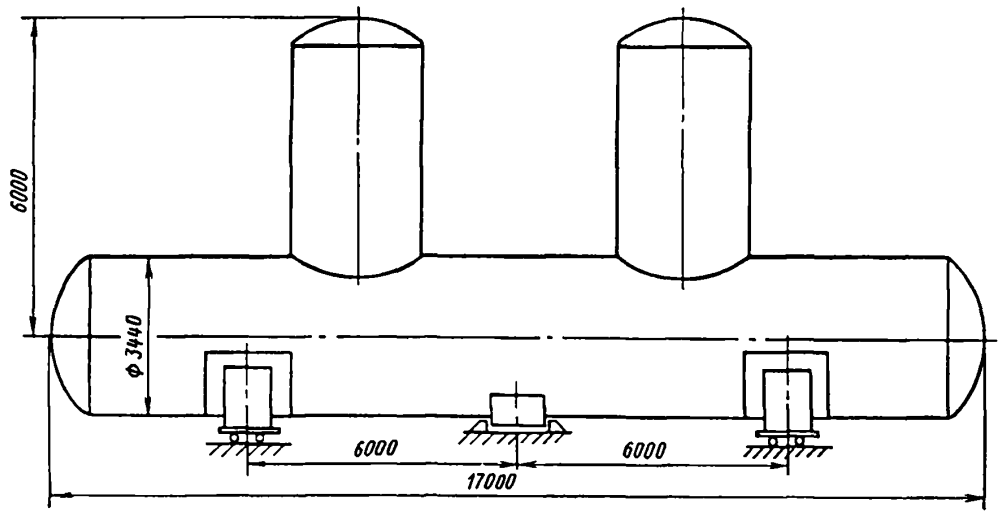
4.3. Основные исходные данные для расчета:

вес деаэратора $Q=1650$ кН (в рабочем состоянии), $Q_0=418$ кН (без воды);

отметка размещения деаэратора в здании АЭС +24,0 м;

сейсмичность площадки АЭС 8 баллов по шкале MSK-64.

Схема деаэратора



Черт. 6

4.4. Схема деаэратора показана на черт. 6. Деаэратор установлен на две катковые опоры и имеет в середине фиксирующую опору, относительно которой происходит продольное тепловое расширение конструкции. Ролики катковых опор зафиксированы в поперечном направлении с помощью продольных полос, входящих в пазы роликов со стороны верхней и нижней опорных плоскостей. Такой способ фиксации предотвращает поперечное смещение деаэратора относительно катковых опор, но не препятствует его опрокидыванию при действии боковых сейсмических нагрузок.

4.5. Продольная сейсмическая нагрузка на деаэратор воспринимается средней фиксирующей опорой. Наличие зазоров в средней опоре приводит к ударным нагрузкам и значительно ухудшает сейсмостойкость деаэратора. Поэтому при проектировании сейсмостойкого деаэратора необходимо заранее устранить люфты и зазоры в опорных элементах.

4.6. При выполнении требований п. 4.5 конструкция деаэратора может быть рассмотрена как линейно-упругая динамическая система и рассчитана на сейсмостойкость по статическому методу. Рассматривается случай, когда собственная частота конструкции f_1 неизвестна.

4.7. Поперечная сейсмическая нагрузка на деаэратор, которую допускается рассматривать приложенной в центре масс конструкции (черт. 7, *а*), определяется по формуле $Q_c^п=Qk_5k_вk_и=1650\cdot0{,}5\cdot2{,}2\cdot2=3630$ кН.

4.8. Вертикальная сейсмическая нагрузка на деаэратор равна $Q_c^в=Qk_5k_вk_и=1650\cdot0{,}5\cdot1{,}0\cdot1{,}0=825$ кН.

4.9. При определении горизонтальной продольной сейсмической нагрузки на деаэратор рекомендуется учитывать наличие в баке свободной поверхности жидкости (см. черт. 7, *б*). Если частотные составляющие сейсмического воздействия значительно выше собственных частот поверхностных колебаний жидкости, находящейся в сосуде, то часть массы жидкости при вынужденных колебаниях остается инертной (неподвижной) и не создает инерционной нагрузки на стенки сосуда. Этот эффект при расчете сейсмических нагрузок по статическому методу рекомендуется упрощенно учитывать с введением дополнительного коэффициента, значение которого определяется соотношением h/l, где l—

размер сосуда в направлении сейсмического воздействия; h — глубина заполнения сосуда жидкостью (при $h/l>0{,}8$ эффект свободной поверхности не учитывается). Величина продольной сейсмической нагрузки на деаэратор определяется по формуле

$$Q_c^{пр} = [(Q - Q_0)h\,/\,l + Q_0]\,k_б k_в k_ц = [(1650 - 418)\,0{,}18 + 418]\,0{,}5 \cdot 2{,}2 \cdot 2 = 1407{,}5 \text{ кН}.$$

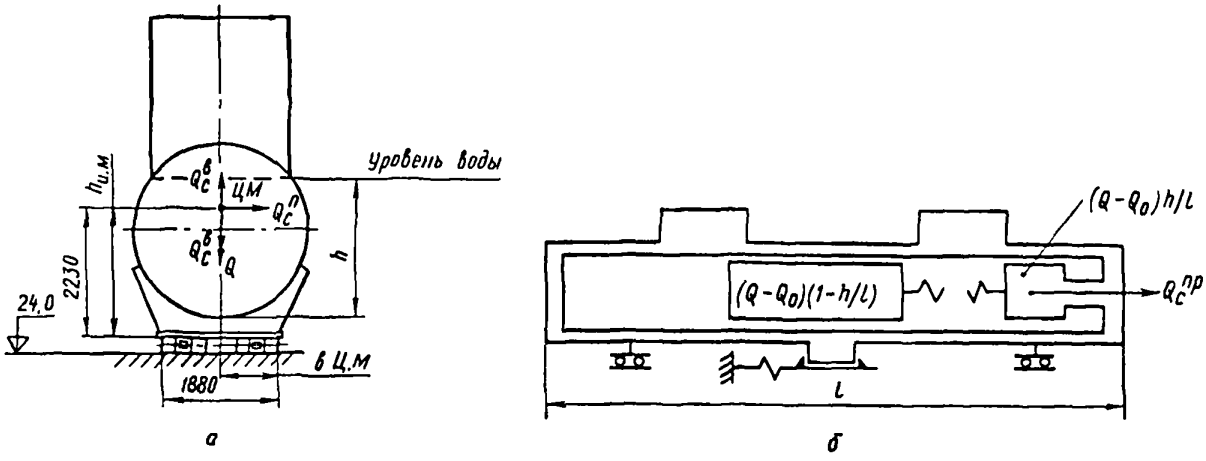
4.10. Проверка условия опрокидывания деаэратора осуществляется путем сопоставления моментов, создаваемых поперечной сейсмической нагрузкой M_c и весовой нагрузкой $M_в$ относительно линии, проходящей через кромки роликов катковых опор,

$$M_c = Q_c^п h_{ц.м} = 3630 \cdot 2{,}23 = 8094{,}9 \text{ кН} \cdot \text{м};$$

$$M_в = (Q - Q_c^в)\,b_{ц.м} = (1650 - 825)\,0{,}94 = 775{,}50 \text{ кН} \cdot \text{м}.$$

При $M_c > M_в$ возможно опрокидывание деаэратора.

Расчетные модели деаэратора



а — поперечная; *б* — продольная

Черт. 7

4.11. Полученные сейсмические нагрузки могут быть использованы при проектировании опорных элементов и разработке конструктивных мероприятий по обеспечению устойчивости от опрокидывания и прочности деаэратора. Следует отметить, что статический метод дает консервативную оценку сейсмостойкости. Степень консервативности значительно возрастает, если низшие собственные частоты конструкции превышают уровень 10—15 Гц. В этом случае при невыполнении условий сейсмостойкости и невозможности обеспечения этих условий с помощью простых и экономичных решений следует оценку сейсмостойкости конструкции производить с использованием низшей частоты f_1 или по линейно-спектральному методу с использованием спектров ответа.

4.12. Для обеспечения прочности опор деаэратора наиболее целесообразно увеличить сечения и размеры несущих элементов, что не приведет к чрезмерному увеличению металлоемкости всей конструкции.

Для обеспечения устойчивости деаэратора от опрокидывания требуется предусмотреть в конструкции опор специальные элементы (башмаки, анкерные болты, тяги, хомуты и т. п.).

5. РАСЧЕТ ТРАНСПОРТНОЙ ПЛАТФОРМЫ ДЛЯ ПЕРЕВОЗКИ ТОПЛИВА АЭУ

5.1. В данном подразделе рассматривается порядок выполнения расчета на сейсмостойкость сложных нелинейных упругогравитационных динамических систем, к которым может быть отнесено транспортное и перегрузочное оборудование АЭУ.

5.2. Транспортная платформа, предназначенная для внутристанционной перевозки чехлов со сборками отработавшего топлива или пеналов герметичных для свежего топлива, относится к оборудованию I категории сейсмостойкости.

Условия сейсмостойкости платформы заключаются в предотвращении утечки радиоактивности из перевозимых контейнеров, т. е. в сохранении их прочности и герметичности при сейсмическом воздействии.

Исходя из этого, при землетрясении считается опасной любая из следующих ситуаций:

опрокидывание или сход с рельсов платформы при сохранении либо при нарушении прочности железнодорожного пути;

соударение перевозимого контейнера с рельсами или грунтом;

нарушение прочности основных несущих элементов транспортной платформы, которое может повлечь за собой падение контейнера с платформы;

нарушение прочности железнодорожного пути.

Сейсмостойкость платформы можно считать обеспеченной, если при заданном сейсмическом воздействии не возникает ни одна из перечисленных выше ситуаций.

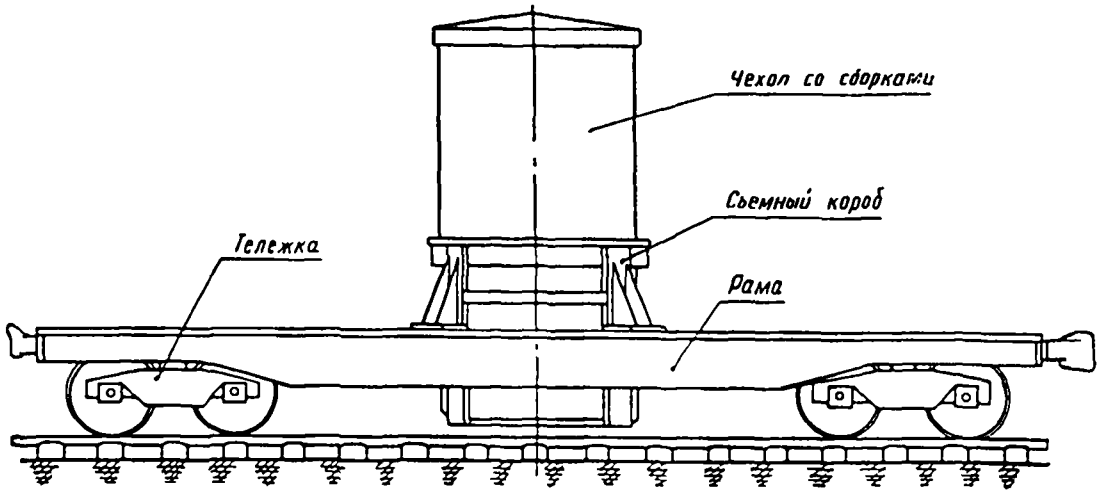
5.3. Общий вид платформы показан на черт. 8.

Платформа состоит из двух тележек и опирающейся на них рамы со сквозным проемом в середине пролета. В проеме размещается съемный короб для установки контейнеров. Нагрузка, передаваемая на каждую тележку через пятник, воспринимается надрессорной балкой и далее через два блока винтовых пружин передается на продольные балки, узлы подшипников качения, колесные пары и рельсы.

Анализ взаимодействия элементов платформы при колебаниях выявил значительную роль различных нелинейных эффектов (проскальзываний, соударений), которые в конечном итоге будут определять инерционные нагрузки и перемещения в данной конструкции. Ввиду этого расчет может быть выполнен только по МДА.

5.4. Расчетная модель платформы представлена в виде плоской многомассовой нелинейной упруго-гравитационной динамической системы с 15 степенями свободы (черт. 9). Вертикальное и поперечное горизонтальное воздействия приложены одновременно и заданы подобными акселерограммами

Платформа для внутристанционной перевозки топлива АЭС



Черт. 8

(в запас расчета) с отношением значений ускорений 2/3. Гравитационные восстанавливающие силы, возникающие в данной колебательной системе при опрокидывании относительно симметрично расположенных боковых вертикальных связей (упругих упоров с зазорами), имитируются реакциями фиктивных упругих связей между массами системы и фиктивной массой с координатой 15.

5.5. В качестве исходного сейсмического воздействия в данном примере использовалась синтезированная акселерограмма СА-482, принятая в качестве характеристики МРЗ интенсивностью 8 баллов по шкале MSK-64.

Для оценки сейсмостойкости нелинейных систем, какой является в данном случае платформа, как правило, недостаточно использование одного процесса сейсмического воздействия. Для более полного исследования желательно проводить расчеты на несколько характерных акселерограмм.

5.6. В расчетной динамической модели платформы с установленным на ней чехлом со сборками рассматривается только поперечное и вертикальное направления движения элементов конструкции при колебаниях. Продольное сейсмическое воздействие не представляет опасности и исключено из рассмотрения.

5.7. Условия восприятия динамических и статических нагрузок для двух тележек платформы приняты идентичными, поэтому в расчетной модели они объединены.

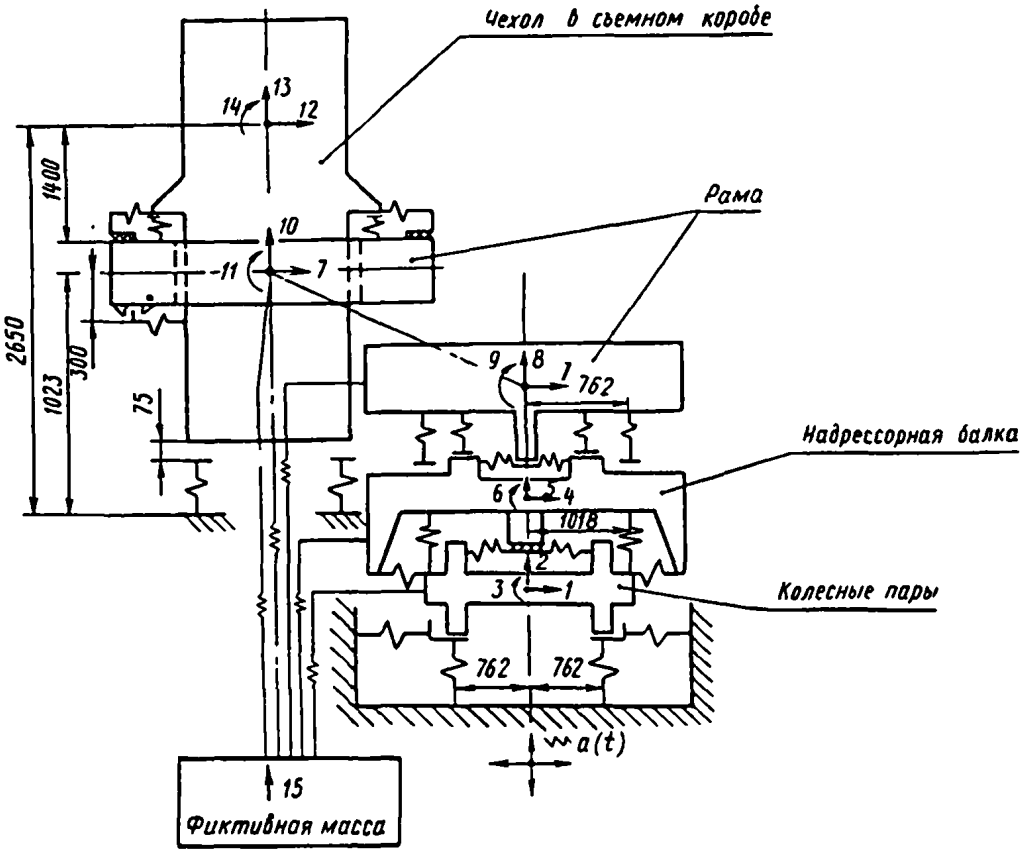
В расчетной модели отражены следующие специфические динамические свойства конструкции:

различное демпфирование в упругих элементах системы, изменяющееся в пределах от 0,01 до 0,05 (в долях от критического);

возможность подъема и опрокидывания жестких тел системы относительно точек присоединения упругих упоров, при этом в случае выключения вертикальных связей движение происходит под действием сил тяжести (реакций фиктивных связей) и их моментов;

переменный характер сил трения при поперечном проскальзывании колесных пар относительно рельсов и опорных лап съемного кожуха относительно рамы платформы; силы трения в элементах переменного трения в этом случае определялись в зависимости от величины упругой реакции в соответствующих вертикальных связях.

Расчетная динамическая модель платформы



Черт. 9

5.8. Расчеты проводились по программе СЕЙСМ-184 (НПО ЦКТИ). Основные результаты расчета приведены в табл. 8. На черт. 10 и 11 показаны зависимости движения элементов системы при вынужденных колебаниях. Результаты показывают, что перемещение колесных пар носит явно выраженный ударный характер с горизонтальным проскальзыванием и ударом в реборду. Отрыв колес от рельсов (как одновременный, так и односторонний) отсутствует. Максимальное поднятие колеса от положения статического равновесия колесной пары составило 7,4 мм, в то время как статическая деформация пути под колесами равнялась 7,9 мм. Горизонтальное смещение центра масс чехла не превышало 120 мм.

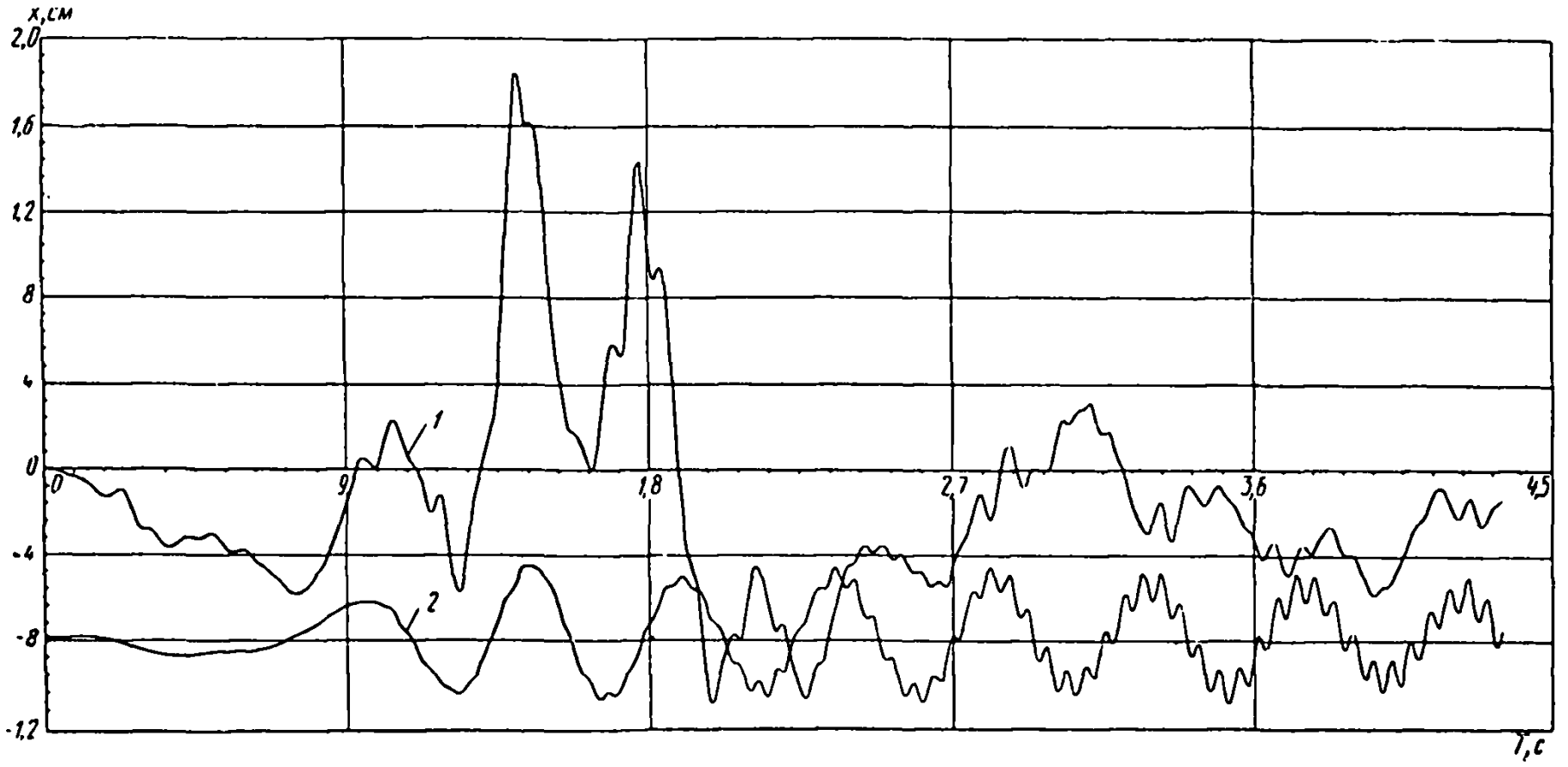
Таблица 8

Основные результаты расчета платформы на сейсмостойкость

Расчетные параметры	Максимальное расчетное значение	Допускаемое значение
Поднятие колеса над рельсом, мм	0,0	30
Вертикальное усилие на рельс от пары колес с одной стороны тележки, кН	279	350 *
Горизонтальное усилие на рельс от пары колес, кН	133	200
Осевое усилие в пружинном блоке, кН	239	280 **
Поперечное усилие в пружинном блоке, кН	48	—
Усилие на ограничители горизонтальных смещений рессорной балки тележки, кН	215	400
Нагрузка на боковой скользун тележки, кН	373	—
Горизонтальное усилие на пятник, кН	272	—
Вертикальная нагрузка в центре рамы, кН	625	800
Усилие на одну лапу короба, кН	243	500
Относительное перемещение между коробом и рельсом, мм	87	135 ***

* Принято исходя из кратковременности нагрузки.
** Нагрузка полного сжатия пружин.
*** Зазор между коробом и рельсом без груза.

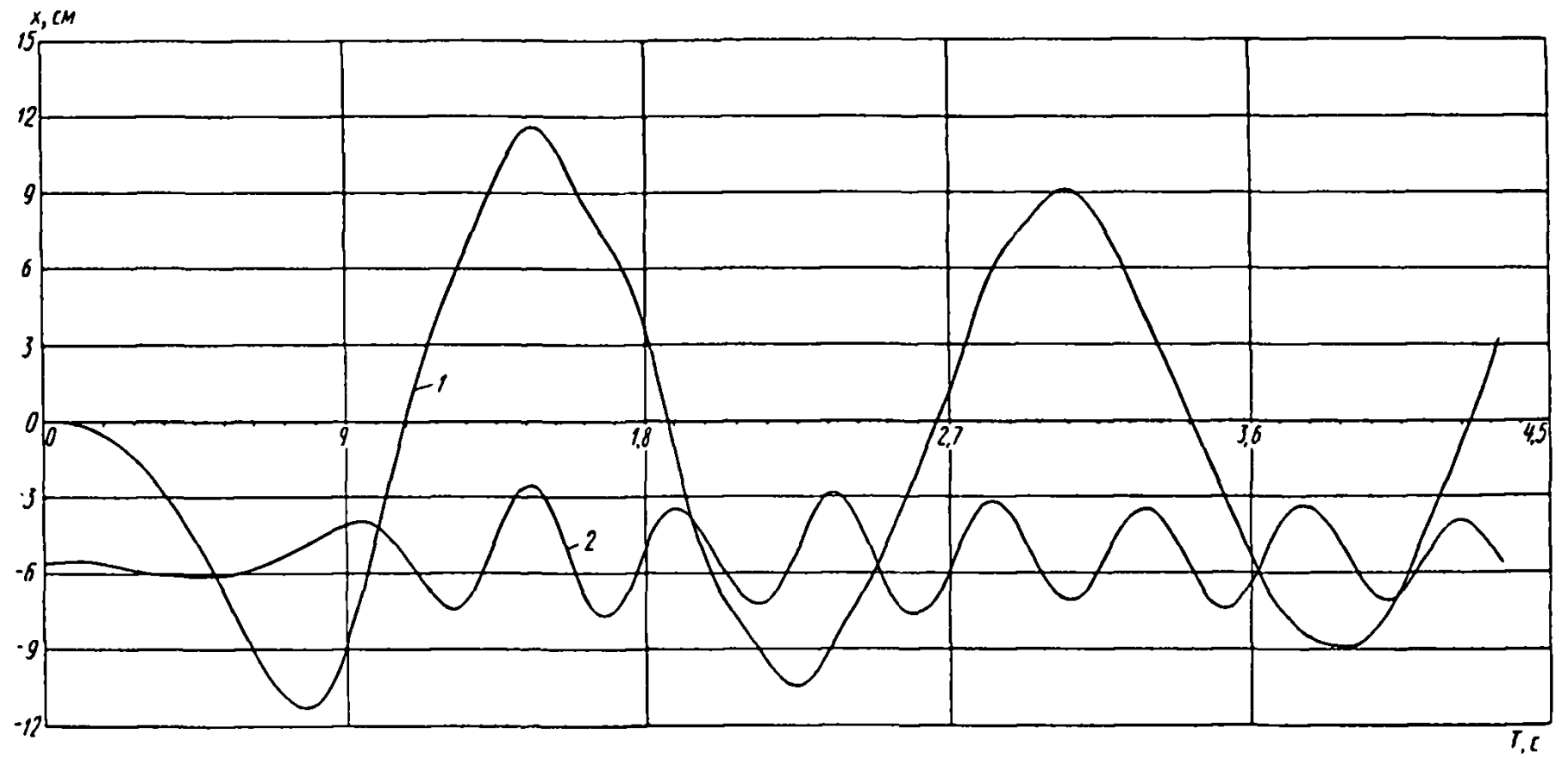
Поступательное движение центра масс колесной пары



1 — горизонтальное; *2* — вертикальное

Черт. 10

Поступательное движение центра масс чехла



1 — горизонтальное; *2* — вертикальное

Черт. 11

5.9. Проведенный расчетный динамический анализ сейсмостойкости платформы с установленным на ней контейнером (чехлом со сборками) позволяет заключить следующее: при 8-балльном землетрясении прочность железнодорожного пути, основных несущих элементов платформы и контейнера обеспечивается, соударение контейнера о грунт отсутствует, опрокидывание или сход с рельсов платформы не происходит.

Таким образом, сейсмостойкость платформы и груза обеспечивается полностью.

6. РАСЧЕТ ТУРБОАГРЕГАТА АЭС

6.1. В данном подразделе рассматривается порядок выполнения расчета на сейсмостойкость оборудования АЭУ, при оценке сейсмостойкости которых необходимо учитывать динамические характеристики опорных конструкций и основания.

6.2. Турбоустановка АЭС с водо-водяным реактором при воздействии ПЗ должна сохранять работоспособность во время и в течение некоторого времени после землетрясения при выработке электроэнергии с негарантированной экономичностью.

Анализ конструкции системы «основание — фундамент — турбоагрегат» показывает, что выход из строя турбоагрегата при сейсмическом воздействии может произойти по следующим причинам:

частичное или полное разрушение фундамента;

выход из строя упорного и опорных подшипников вследствие силового разрушения или нарушений в системе маслоснабжения;

разрушение шпоночных соединений и элементов крепления статора к фундаменту;

разрушение валопровода;

большие относительные смещения роторов и цилиндров, приводящие к задеваниям;

разрушение основных паропроводов;

выход из строя конденсаторов;

нарушения в системах регулирования, контроля и электрической части.

6.3. В общем случае турбоустановка должна быть рассчитана на три воздействия: два горизонтальных и вертикальное. Однако, учитывая большую жесткость системы в вертикальной плоскости и меньшую интенсивность вертикального сейсмического воздействия, можно ограничиться рассмотрением только горизонтальных воздействий.

В данном примере приведен расчет турбоагрегата на сейсмическое воздействие, направленное вдоль оси валопровода, которое является наиболее опасным.

6.4. Динамическая система «основание — фундамент — турбоагрегат» имеет существенную нелинейность и включает в себя следующие виды нелинейных связей: жесткость смазочного слоя упорного подшипника; сухое трение между опорами и фундаментными плитами; шпоночные соединения с зазором (включающиеся связки). Поэтому для расчета турбоагрегата на сейсмостойкость наиболее приемлем МДА, который позволяет учитывать в расчетной модели все указанные выше виды нелинейности.

6.5. На черт. 12 показана общая расчетная модель турбоагрегата АЭС мощностью 1000 МВт при расчете на сейсмическое воздействие, направленное вдоль оси валопровода. Так как конструкция турбоагрегата имеет плоскость симметрии, рассматривается плоская расчетная модель.

Коэффициенты жесткости и относительное демпфирование в грунте ($k=0{,}05$) задаются в соответствии с инженерно-геологическими условиями площадки строительства АЭС. Колонны фундамента представлены стержнями, имеющими определенные параметры жесткости и демпфирования ($k=0{,}04$).

На черт. 13 и 14 показаны подсистемы «валопровод — опорный подшипник» и «корпус ПВД — опоры — верхняя плита фундамента».

Корпуса цилиндров и конденсаторов в расчетной модели представлены жесткими недеформируемыми телами. ЦНД соединен с верхней плитой с элементами трения с ограничением, при этом величина силы трения определялась с учетом реакции от разрежения в конденсаторе.

В расчетной схеме введена жесткость трубопроводов охлаждающей воды. Для оценки деформации компенсаторов ресиверов СПП — ЦНД в расчетную схему включены СПП.

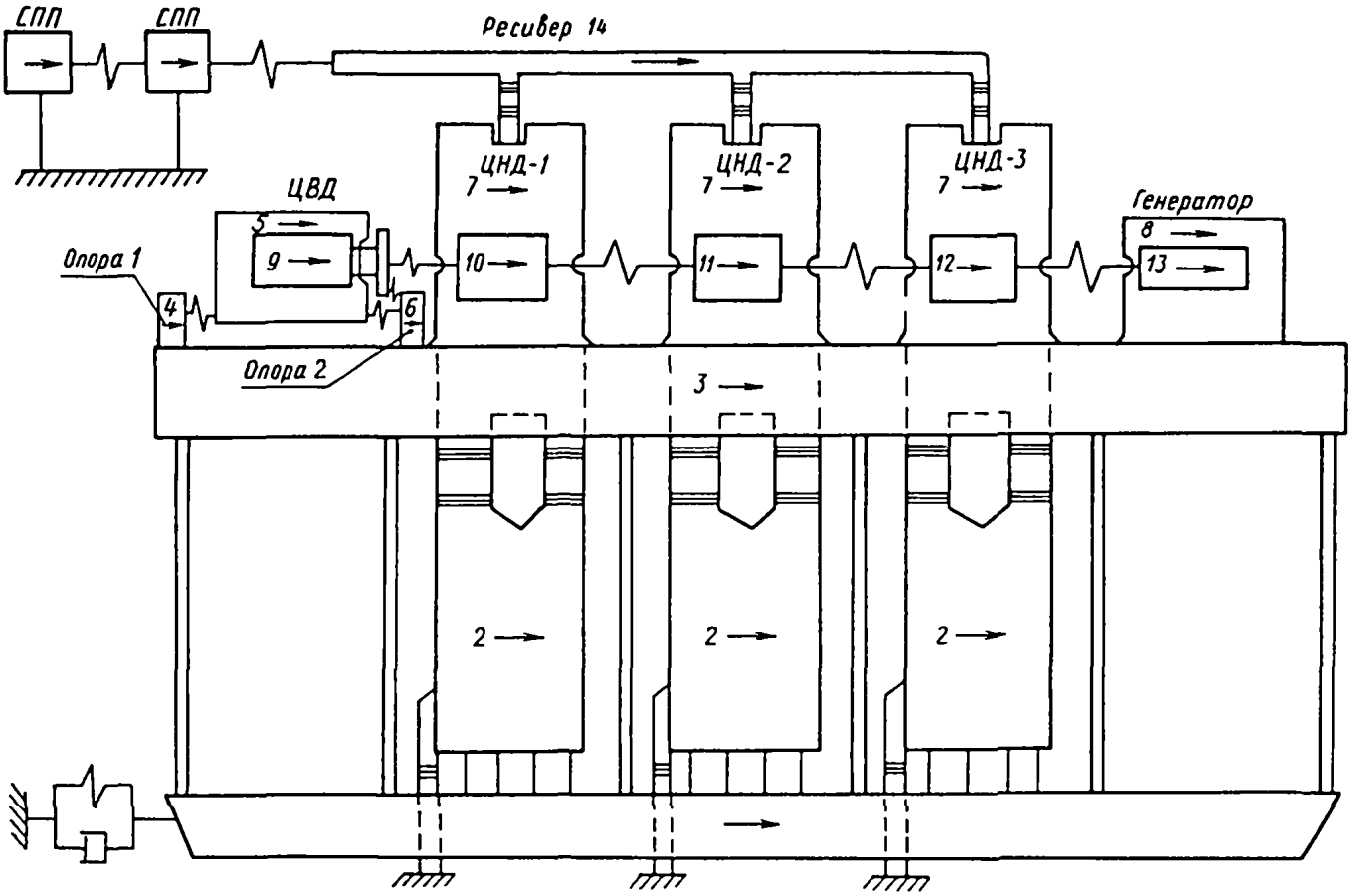
Относительное демпфирование в элементах конструкции турбоагрегата (роторе, трубопроводах, опорах) задавалось равным 0,02.

6.6. В качестве характеристик ПЗ в данном примере использовались акселерограммы землетрясений в Газли и Эль-Центро, приведенные к интенсивности 6 баллов по шкале MSK-64.

6.7. Расчеты проводились по программе СЕЙСМ-184 (НПО ЦКТИ). Основные результаты расчета приведены в табл. 9. Как видно из полученных результатов, турбоагрегат является сейсмостойким при заданном сейсмическом воздействии.

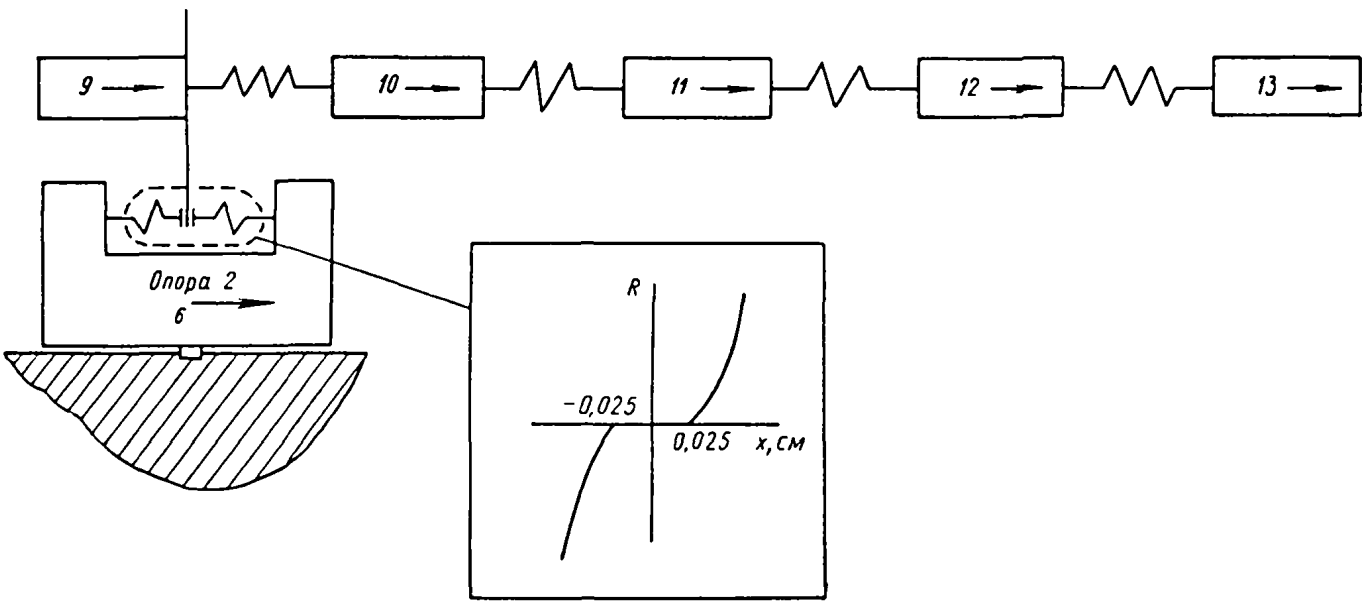
Наиболее нагруженными элементами системы являются упорный подшипник турбины и колонны фундамента.

Расчетная модель турбоагрегата при расчете на сейсмическое воздействие, направленное вдоль оси валопровода



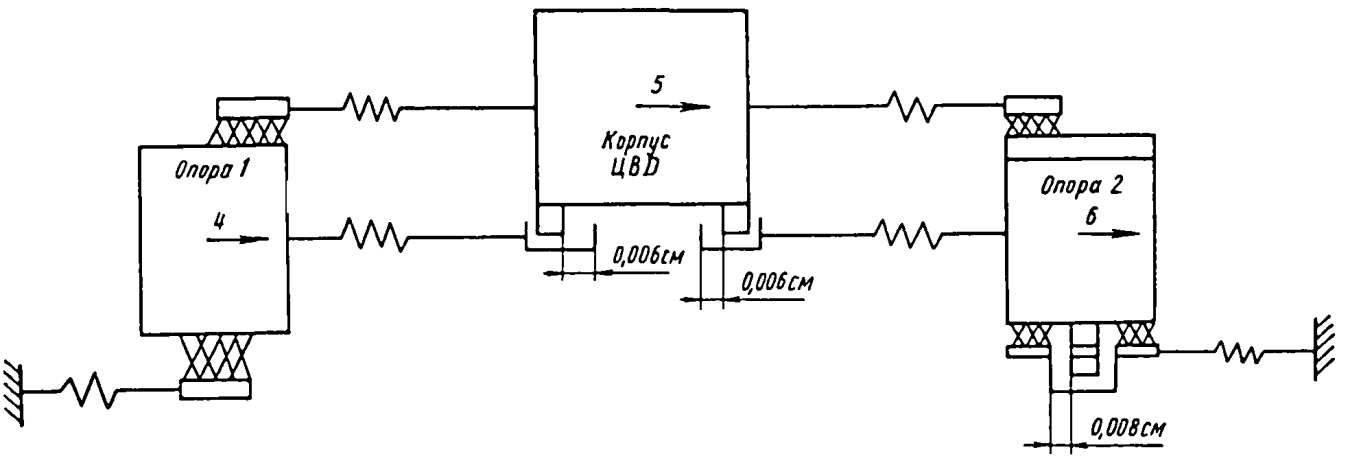
Черт. 12

Расчетная схема системы «валопровод — упорный подшипник — опора 2»



Черт. 13

Расчетная схема системы «опора 1 — ЦВД — опора 2»



Черт. 14

Таблица 9

Основные результаты расчета турбоагрегата на сейсмостойкость

Расчетные параметры	Допускаемое значение	Вариант расчета	
		Газли	Эл-Центро
Удельное давление на колобки упорного подшипника, МПа	15	12,7	14,8
Напряжение в шпонке ЦНД, МПа:			
$(\tau_s)_s$	88	23	28,5
$(\sigma_s)_s$	374	58,5	73,5
Напряжение в шпонке опоры № 2, МПа:			
$(\tau_s)_s$	200	59	74
$(\sigma_s)_s$	850	147,5	184,5
Напряжение $(\sigma_s)_1$ в шпонке ЦВД, МПа	230	27,5	17,5
Деформация стоек конденсатора, мм	33	5,0	7,3
Смещение ротора ЦВД относительно корпуса, мм	2	1,7	1,85
Смещение ротора ЦНД относительно корпуса, мм	5	2,15	2,47
Деформация колонн фундамента, мм	50	32	41

ПРИЛОЖЕНИЕ 5
Рекомендуемое

ПРИБЛИЖЕННЫЙ РАСЧЕТ ТРУБОПРОВОДОВ НА ПРОЧНОСТЬ ПРИ СЕЙСМИЧЕСКОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

Приведенная ниже методика служит для предварительной оценки сейсмопрочности трубопроводов групп А, В и С на стадиях проектирования до эскизного проекта включительно. В отдельных случаях при согласовании с главным конструктором проекта эта методика может быть использована для проведения окончательного поверочного расчета трубопроводов группы С.

Методика основывается на статической теории сейсмостойкости конструкций. В качестве исходных данных для определения расчетной интенсивности сейсмической нагрузки используются поэтажные спектры ответа на отметках закрепления трубопроводов. Расчеты могут быть выполнены по одной из существующих программ, предназначенных для оценки прочности трубопроводов при статических нагрузках.

1. Выполняются три отдельных расчета трубопровода на действие весовой нагрузки (расчеты 1, 2, 3). Нагрузка поэтапно прикладывается в вертикальном (по оси $x3$) и двух горизонтальных направлениях (по осям x_1 и x_2). В каждом отдельном расчете определяются приведенные напряжения $(\sigma)_{c1}$, $(\sigma)_{c2}$, $(\sigma)_{c3}$, усилия в опорах и составляющие перемещения сечений трубопровода в направлении главных осей (x_1, x_2, x_3). Давление и усилия затяжки упругих опор принимаются равными нулю. При расчетах учитываются жесткости всех опор и гидроамортизаторов.

2. Приближенное значение низшей собственной частоты трубопровода определяется по формуле

$$f_1 = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{g}{\lambda_{max}}},$$

где λ_{max} — максимальная абсолютная величина составляющих перемещений трубопровода по одной из осей при действии весовой нагрузки отдельно по каждому из принятых направлений; g — ускорение свободного падения.

3. Результирующее значение спектрального ускорения вычисляется по формуле

$$A_p = \sqrt{a_1^2(f_1) + a_2^2(f_1) + a_3^2(f_1)},$$

где $a_1(f_1)$, $a_2(f_1)$, $a_3(f_1)$ — ускорения (в долях g), определенные по спектрам ответа при частоте f_1, заданных для трех направлений сейсмического воздействия на наивысшей отметке закрепления трубопровода.

4. Значения приведенных напряжений в сечениях трубопровода от действия сейсмических и эксплуатационных нагрузок определяются по формуле

$$(\sigma_s)_2 = A_p\sqrt{(\sigma)_{c1}^2 + (\sigma)_{c2}^2 + (\sigma)_{c3}^2} + (\sigma)_2,$$

где $(\sigma)_{c1}$, $(\sigma)_{c2}$, $(\sigma)_{c3}$ — приведенные напряжения, полученные расчетами 1, 2, 3; $(\sigma)_2$ — приведенное напряжение, полученное расчетом трубопровода без учета сейсмического воздействия.

Для прямолинейных отрезков трубопровода допускается определять напряжение $(\sigma_s)_2$ следующим образом:

если $A_p\sqrt{(\sigma)_{c1}^2 + (\sigma)_{c2}^2 + (\sigma)_{c3}^2} \leqslant 0{,}5\sigma_{\varphi p}$, то $(\sigma_s)_2 = \sigma_{\varphi p}$;

если $A_p\sqrt{(\sigma)_{c1}^2 + (\sigma)_{c2}^2 + (\sigma)_{c3}^2} > 0{,}5\sigma_{\varphi p}$, то $(\sigma_s)_2 = A_p\sqrt{(\sigma)_{c1}^2 + (\sigma)_{c2}^2 + (\sigma)_{c3}^2} + 0{,}5\sigma_{\varphi p}$,

где $\sigma_{\varphi p}$ — окружное напряжение на внутренней поверхности трубы от внутреннего давления.

5. Усилия воздействия трубопровода на оборудование при совместном действии эксплуатационных и сейсмических нагрузок определяются по формуле

$$x^c = A_p\sqrt{x_1^2 + x_2^2 + x_3^2} + |x_э|,$$

где x^c — компонента вектора усилий (любая из сил по осям x_1, x_2, x_3, любой момент относительно осей x_1, x_2, x_3) при совместном действии всех нагрузок;

$x_э$ — значение той же компоненты, определяемое расчетом трубопровода на действие только эксплуатационных нагрузок;

x_1, x_2, x_3 — значения той же компоненты, определенные в расчетах 1, 2, 3.

6. Нагрузки упругих (пружинных) подвесок при совместном действии сейсмических и эксплуатационных нагрузок определяются по формуле

$$P^{c} = k_{п} A_{р} \left| \overline{\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3} + |P_{э}| \right.,$$

где λ_1, λ_2, λ_3 — перемещения по оси x_3 трубопровода в месте установки подвески, определяемые в расчетах 1, 2, 3;

$P_{э}$ — нагрузка подвески в рабочем состоянии;

$k_{п}$ — жесткость подвески.

7. Реакции опор скольжения и направляющих опор вычисляются аналогично п. 5. Например, реакцию по оси x_3 определяют по формуле

$$R^{c} = A_{р} \left| \overline{R_1^2 + R_2^2 + R_3^2} + |R_{э}| \right.,$$

где R_1, R_2, R_3 — реакции опоры по оси x_3, определяемые в расчетах 1, 2, 3;

$R_{э}$ — реакция опоры по оси x_3, определяемая расчетом трубопровода на действие только эксплуатационных нагрузок.

8. Реакция гидроамортизатора определяется аналогично реакции направляющей опоры, причем его реакция при эксплуатационных нагрузках принимается равной нулю.

ПРИЛОЖЕНИЕ 6

Рекомендуемое

РЕКОМЕНДАЦИИ ПО АНТИСЕЙСМИЧЕСКОМУ ПРОЕКТИРОВАНИЮ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ АЭУ

1. Оборудование, входящее в состав отдельной системы (компоновки, контура) и соединенное относительно короткими участками трубопроводов, рекомендуется располагать на едином фундаменте.

2. Опорные элементы оборудования следует располагать, по возможности, на минимальном по высоте удалении от его центра масс и стремиться размещать опоры вблизи наиболее массивных элементов конструкции.

3. Антисейсмические амортизаторы и раскрепления должны устанавливаться в местах концентрации массы и наибольшей податливости оборудования и трубопроводов. При этом величина податливости амортизаторов или раскреплений должна быть меньше, чем податливость конструкции в точке присоединения и в направлении действия этих элементов.

4. Опорные узлы оборудования должны состоять, по возможности, из элементов минимальной длины и высоты для обеспечения максимально возможной жесткости и фиксировать оборудование во всех направлениях (угловых и поступательных). При этом преимущественными видами деформации опорных элементов являются сдвиг, растяжение и сжатие перед изгибом и кручением.

5. Внутрикорпусные устройства оборудования должны быть закреплены в корпусе с помощью неподвижных соединений или дистанционирующих элементов (перегородок, гребенок, каркасов, перфорированной набивки и т. п.). При этом жесткость элементов крепления должна быть больше жесткости конструктивных элементов (трубок, пакетов, кассет и т. п.) в местах их закрепления.

6. Следует стремиться не применять для деталей и узлов соединения с зазорами и не допускать соударений между элементами оборудования, а также элементами опорных конструкций. При использовании подвижных соединений зазоры должны выбираться минимально необходимыми по условиям работоспособности.

7. Для предварительной оценки прочности и устойчивости элементов оборудования при сейсмическом воздействии рекомендуется проводить статические расчеты на весовые нагрузки при условном повороте конструкции относительно фундамента или основания на произвольный угол от 0 до 360° в любой из вертикальных плоскостей. Роль сейсмической нагрузки в этом случае играет собственный вес элементов конструкции. Положительные результаты проверки обеспечивают в большинстве случаев выполнение условия сейсмостойкости конструкции на этапе проведения поверочного расчета при сейсмичности до 9 баллов включительно.

8. Наиболее сейсмостойкими являются конструкции, значения низших собственных частот которых составляют величину не менее 10 Гц. Для обеспечения указанного уровня частот рекомендуется на этапе предварительной оценки сейсмостойкости (см. п. 7 данного приложения) определять статические прогибы элементов конструкции относительно их опор (фикспунктов) и ограничивать их величиной не более 1 мм.

СОДЕРЖАНИЕ

1. Общие положения 1
2. Требования к расчету 3
3. Оценка сейсмостойкости 4
Приложение 1. Расчетные модели энергетического оборудования атомных энергетических установок (АЭУ) при анализе сейсмостойкости 6
Приложение 2. Методы расчета на сейсмостойкость 9
Приложение 3. Синтезированная модель сейсмического воздействия 14
Приложение 4. Примеры расчета на сейсмостойкость оборудования и трубопроводов АЭС 19
Приложение 5. Приближенный расчет трубопроводов на прочность при сейсмическом воздействии 33
Приложение 6. Рекомендации по антисейсмическому проектированию энергетического оборудования АЭУ 35

Редактор *С. В. Иовенко*

Технический редактор *А. Н. Крупенева* Корректор *Л. А. Крупнова*

Сдано в набор 20.03.86. Подписано к печ. 10.09.86. Формат бум. 60×90¹/₈.
Объем 4,75 печ. л. Тираж 500. Заказ 292. Цена 95 коп.

НПО ЦКТИ. 194021, Ленинград, Политехническая ул., д. 24

ЛИСТ РЕГИСТРАЦИИ ИЗМЕНЕНИЙ РТМ 108.020.37—81

Изм.	Номера листов (страниц)				Номер документа	Подпись	Дата	Срок введения изменения
	измененных	замененных	новых	аннулированных				

gost.e-ecolog.ru