

Глава 3. ВОЗДЕЙСТВИЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ НА СООРУЖЕНИЯ. СЕЙСМИЧЕСКАЯ НАГРУЗКА

Приводимые ниже рассуждения направлены на инженерное понимание теории сейсмостойкости сооружений, поэтому мы не касаемся здесь сложнейших вопросов сейсмического районирования территории, получения расчетных параметров движения земной коры и фундаментов и других вопросов сейсмологии.

В отличие от других воздействий землетрясения – крайне редкие явления, и накопление фактической информации для статистической обработки затруднено. Наши рассуждения построены на Российских нормативных документах, в частности, СНиП¹. Однако мы не нашли способа изложить нормативные рекомендации обоснованно в теоретическом плане как это обычно делается в учебниках, поэтому пришлось переработать рекомендации нормативных документов. Результаты расчетов сейсмических сил не противоречат (точно совпадают) нормативным значениям, но их интерпретация несколько отличается. Мы старались придерживаться идей, изложенных в известных источниках² и более соответствующих нашей логике.

Во-первых, мы выделили две стороны в определении нагрузки. Первая из них связана с районированием и назначением расчетных параметров воздействий независимо от сооружений. Вторая - с расчетом нагрузки на само сооружение при известных расчетных параметрах воздействий. В существующих нормативных актах эти две стороны не разделяются и возникают трудности в расчетах новых сооружений, описания которых нормы не приводят. Кроме того, возникает много вопросов о классификационных признаках, и, в частности, о том, к какому классу отнести известное сооружение. Например, особо ответственное сооружение не определяется объективными параметрами, а зависит от субъективных мнений заказчиков и ведомств.

3.1. Измерение характеристик сейсмического воздействия. Спектральные кривые

Землетрясение, или сейсмическое воздействие связано с тектоническими движениями земной коры, смещениями и разрывами в местах разломов и складок земной поверхности и в более глубоких зонах, а также вулканической деятельностью. Оно передается на фундамент сооружений толчками и беспорядочными движениями (колебаниями). Землетрясение распространяется волнами

¹ СНиП II-7-81. Строительство в сейсмических районах. – М., 1982.

² Ньюмарк Н.М., Розеблут Э. Основы сейсмостойкого строительства. - М.: Стройиздат, 1980 (Перевод с английского: Nathan M. Newmark, Emilio Rosenblueth. Fundamentals of Earthquake Engineering, 1978).

(продольными - вдоль луча от гипоцентра к зданию, поперечными и поверхностными).

Сила землетрясения обычно характеризуется магнитудой (магнитуда землетрясения характеризует меру высвобождаемой энергии), а его интенсивность (степень вызванных землетрясением разрушений), зависящая от магнитуды, расстояния от гипоцентра и состава грунтов по пути движения волн, измеряется в баллах по определенной шкале. Наиболее широко в мире используется шкала Ц.Ф. Рихтера (Richter C.F.) в России - ОСТ ВКС 4537 (табл. 3.1).

Таблица 3.1

Шкала интенсивности землетрясений

Название и сила землетрясения, балл	Признаки землетрясения	
	Прочие	В зданиях и сооружениях
Незаметное 1 балл	Землетрясение не ощущается.	Повреждений нет.
Очень слабое 2 балла	Отмечается отдельными, очень чуткими людьми, находящимися в полном покое.	Повреждений нет.
Слабое 3 балла	Внимательными наблюдателями замечается очень легкое раскачивание висячих ламп, комнатных цветов, занавесок, открытых дверей, неподвижных автомашин. Колебания отмечают немногими людьми, находящимися в спокойном состоянии внутри помещения.	Повреждений нет.
Умеренное 4 балла	Легкое раскачивание висячих предметов и неподвижных автомашин. Легкое колебание жидкости в сосудах. Слабый звон плотно составленной неустойчивой посуды. Землетрясение распознается большинством людей, находящихся внутри зданий. В редких случаях спящие люди просыпаются.	Повреждений нет.
Довольно сильное 5 баллов	Заметно качаются висячие предметы. В редких случаях маятники стенных часов останавливаются. Из наполненных сосудов иногда выплескивается жидкость. Неустойчивая посуда и украшения, стоящие на полках, опрокидываются. Ощущается всеми людьми внутри зданий и большинством под открытым небом; все просыпаются. Животные беспокоятся.	Легкий скрип полов и перегородок. Дребезжание стекол, осыпание побелки. Движение незакрытых дверей и окон. В отдельных зданиях легкие повреждения.
Сильное 6 баллов	Качаются висячие предметы. Иногда падают книги с полок и сдвигаются картины. Многие маятники стенных часов останавливаются. Легкая мебель сдвигается. Падает посуда. Многие люди выбегают из помещений. Передвижение людей неустойчивое. Животные выбегают из укрытий.	Во многих зданиях легкие повреждения. В отдельных зданиях групп А и Б значительные повреждения. В редких случаях при сырых грунтах тонкие поперечные трещины на дорогах.
Очень сильное 7 баллов	Сильно качаются висячие лампы. Легкая мебель сдвигается. Падают книги, посуда, вазы. Все люди выбегают из помещений и в отдельных случаях выпрыгивают из окон. Передвигаться без опоры трудно.	В большинстве зданий группы А значительные повреждения и в отдельных—разрушения. В большинстве зданий группы Б легкие повреждения и во многих—значительные повреждения. Во многих зданиях группы В легкие повреждения и в отдельных—значительные повреждения. На крутых откосах насыпей дорог редкие оползни, в отдельных случаях поперечные трещины на дорогах. В единичных случаях нарушения стыков трубопроводов. Повреждения каменных оград.

Название и сила землетрясения, балл	Признаки землетрясения		
	Прочие		В зданиях и сооружениях
Разрушительное 8 баллов	Часть висячих ламп повреждается. Мебель сдвигается и частично опрокидывается. Люди с трудом удерживаются на ногах. Все выбегают из помещений.	Во многих зданиях группы А разрушения и в отдельных - обвалы. В большинстве зданий группы Б значительные повреждения и в отдельных - разрушения. В большинстве зданий группы В легкие повреждения и во многих - значительные повреждения. Небольшие оползни на крутых откосах выемок и насыпей дорог. Отдельные случаи разрыва стыков трубопроводов. Памятники и статуи сдвигаются или опрокидываются. Каменные ограды обрушиваются	
Опустошительное 9 баллов	Мебель опрокидывается и ломается. Сильное беспокойство животных.	Во многих зданиях группы А обвалы. Во многих зданиях группы Б - разрушения и в отдельных - обвалы. Во многих зданиях группы В значительные повреждения и в отдельных - разрушения. В некоторых случаях повреждение насыпей дорог. В отдельных случаях искривление железнодорожных рельсов. Большое количество трещин на дорогах. Многочисленные разрывы и повреждения трубопроводов. Памятники и статуи опрокидываются. Большая часть труб и башен разрушается.	
Уничтожающее 10 баллов	Многочисленные повреждения предметов домашнего обихода. Животные мечутся и кричат. Ломаются ветви и старые стволы деревьев.	Во многих зданиях группы Б обвалы. Во многих зданиях группы В разрушения и в отдельных—обвалы. Значительные повреждения насыпей и дамб. Местные искривления железнодорожных рельсов. Разрывы трубопроводов. На дорогах много трещин и деформаций; опрокидывание труб, башен, памятников.	
Катастрофа 11 баллов	Гибель имущества под обломками зданий.	Общее разрушение зданий. Разрушение насыпей на большом протяжении. Трубопроводы приходят в полную негодность. Железнодорожные пути искривляются по всей длине.	
Сильная катастрофа 12 баллов	Гибнет значительная часть населения от обвалов зданий. Растительность и животные погибают от обвалов и осыпей в горных районах.	Общее разрушение зданий и сооружений.	
П р и м е ч а н и е: Типы сооружений: А - одноэтажные дома из кирпича - сырца, самана и т.п.; Б - кирпичные и каменные здания; В - деревянные дома.			

Известные неудобства создают субъективный характер оценок по шкалам. В них используются такие показатели как реакция человека на землетрясения или состояние зданий и сооружений.

Таким образом, здания и сооружения играют роль приборов, определяющих интенсивность землетрясения, и одновременно являются объектами, нуждающимися в защите. С течением времени конструктивные решения построек улучшаются и, следовательно, нужны более сильные землетрясения, чтобы их повредить. В этом случае имеется опасность, что здания, построенные позднее улучшенных построек, не выдержат сейсмического воздействия. В связи с этим появляется необходимость объективной оценки интенсивности землетрясений с помощью инструментальных наблюдений.

Для определения нагрузки на здания необходимо знать величины ускорений, скоростей и перемещений фундамента и изменение их во времени. Эти ха-

рактические характеристики могут измеряться на специальных сейсмических станциях. Сеть таких станций дает возможность районирования территорий по интенсивности землетрясений.

С конца 30-х г.г. XX в. такие станции начали создаваться. Они оснащаются сейсмографами (регистрирующими отклонение тяжелого маятника при движении станины, закрепленной на фундаменте) и акселерографами (регистраторами ускорения).

Сейсмограф представляет собой станину, жестко прикрепленную к фундаменту, к которой шарнирно крепятся маятники с различным периодом (собственной частотой) колебаний. Схема крепления маятника к станине показана на рис. 3.1.

Сосредоточенная в одной точке масса (груз) находится в равновесии под действием:

- инерционной силы

$$I_n = -m(\ddot{x}_o + \ddot{x})$$

($\ddot{x}_o = \frac{d^2 x_o}{dt^2}$ - ускорение движения станины, $\ddot{x} = \frac{d^2 x}{dt^2}$ - ускорение движения груза относительно станины);

- сил внутреннего сопротивления (обусловленных главным образом демпфером):

$$F = -c\dot{x}$$

($\dot{x} = \frac{dx}{dt}$ - скорость движения груза относительно станины);

- упругой «восстанавливающей» силы, которая вызвана деформацией системы крепления, в том числе и подвески:

$$P = \frac{x}{\delta_{11}}$$

(x - перемещение груза относительно станины, δ_{11} - перемещение системы крепления от действия единичной горизонтальной силы в уровне груза).

Уравнение равновесия груза - сумма проекций сил на горизонтальную ось - имеет вид (с правой стороны – внешняя нагрузка):

$$\frac{x}{\delta_{11}} = -m(\ddot{x}_o + \ddot{x}) - c\dot{x}.$$

После деления на m получаем удельную (пропорциональную массе) нагрузку на груз:

$$\bar{S} = \omega^2 x = -\ddot{x}_o - \ddot{x} - 2\alpha \cdot \dot{x}, \quad (3.1)$$

где введены обозначения $\omega^2 = (m\delta_{11})^{-1}$ и $\alpha = c/(2m)$.

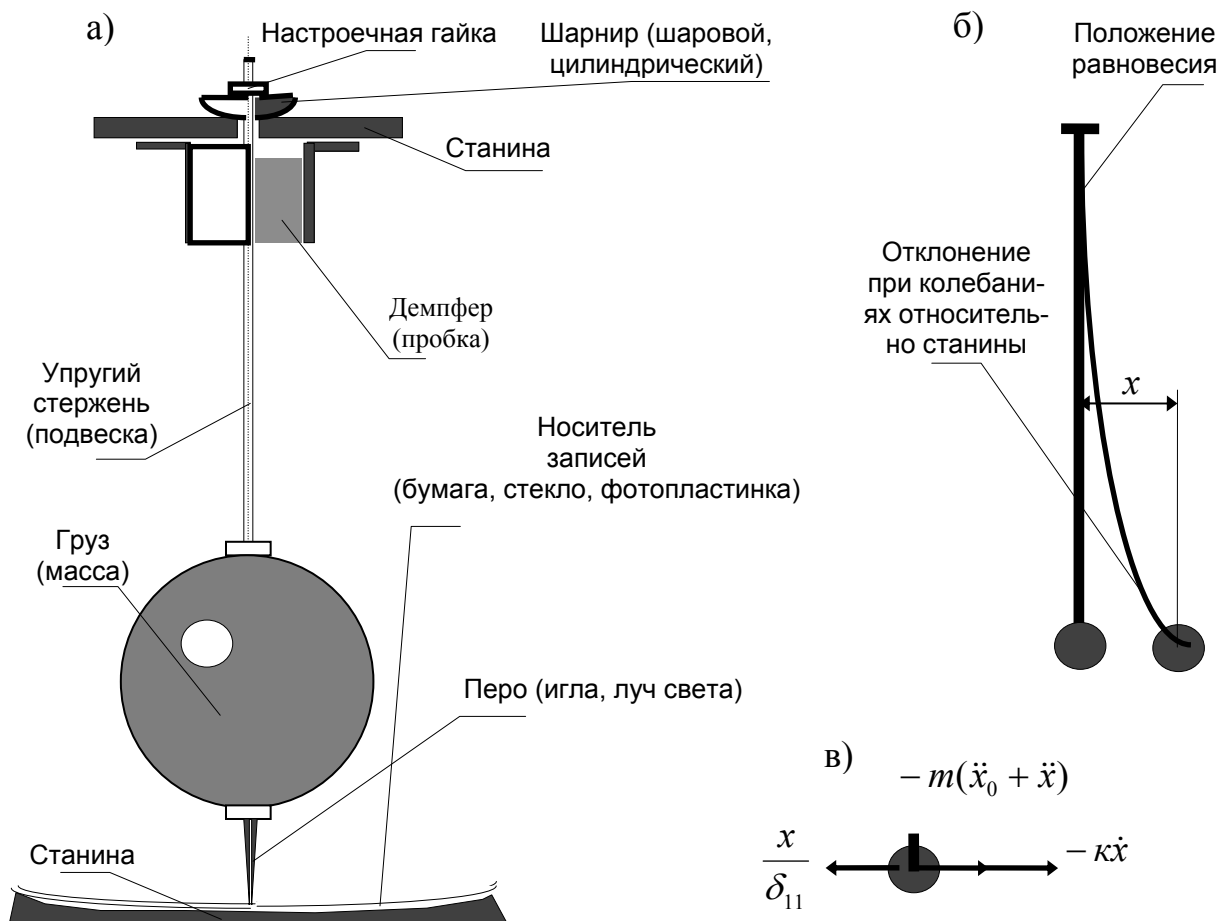


Рис. 3.1. Схема маятникового сейсмометра:

а - конструктивная схема; б - расчетная схема маятника на упругой подвеске;
в - силы, приложенные к массе маятника: x/δ_{11} - восстанавливающая сила за счет упругости подвески; $-m(\ddot{x}_o + \ddot{x})$ - сила инерции; $-c\dot{x}$ - сила сопротивления

После переноса неизвестных относительных перемещений x в левую часть будем иметь дифференциальное уравнение

$$\ddot{x} + 2\alpha \cdot \dot{x} + \omega^2 x = -\ddot{x}_o, \quad (3.2)$$

решение которого складывается из общего решения однородного уравнения (при этом правая часть (3.2) равна нулю) и частного решения неоднородного уравнения:

$$x = A \cdot \exp(-\alpha \cdot t) \sin(\varpi \cdot t + \varphi) + \frac{1}{\varpi^2} \int_0^t \ddot{x}_o(u) \cdot \exp(-\alpha(t-u)) \cdot \sin(\varpi(t-u)) du, \quad (3.3)$$

постоянные коэффициенты A (амплитуда) и φ (начальная фаза) находятся из начальных условий. Если например, маятник до начала землетрясения находился в покое (при $t = 0$ перемещение $x = 0$ и скорость $\dot{x} = 0$), то $A = 0$ и $\varphi = 0$. При этих условиях общее решение отсутствует и:

$$x = \frac{1}{\varpi^2} \int_0^t \ddot{x}_o(u) \cdot \exp(-\alpha(t-u)) \cdot \sin(\varpi(t-u)) du. \quad (3.4)$$

В уравнениях (3.3) и (3.4) введено обозначение $\varpi^2 = \omega^2 - \alpha^2$, физический смысл которого ясен из графика решения однородного уравнения - без внешней силы (рис. 3.2): ϖ - круговая³ частота собственных (свободных) колебаний.

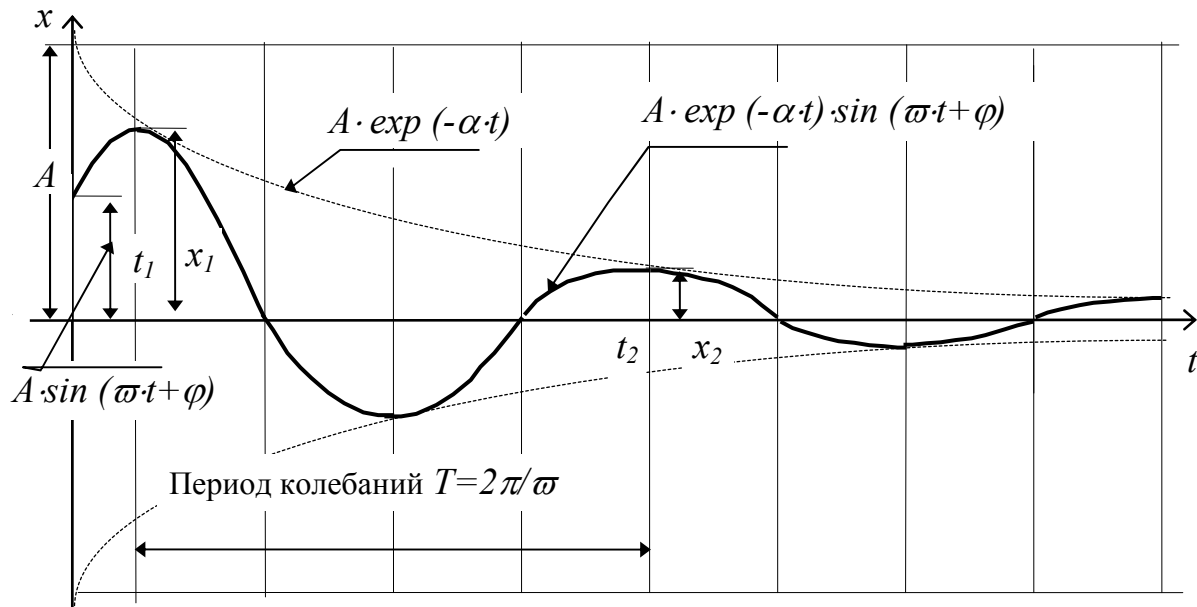


Рис. 3.2.

График общего решения однородного уравнения

Для того чтобы узнать эту частоту и определить степень или коэффициент затухания, необходимо провести эксперимент, в котором при неподвижной станине вывести маятник из положения равновесия и записать колебания. В результате получим график вида, представленного на рис. 3.2. Если измерить разницу по времени между соседними максимумами амплитуды, то получим период $T = t_2 - t_1$, а по нему - и частоту $\varpi = 2\pi/T$.

³ Круговая частота - количество колебаний в 2π секунд, частота часто измеряется и в герцах (Гц) — количество колебаний в одну секунду.

Для определения коэффициента затухания измерим две соседние по периоду амплитуды x_1 и x_2 и возьмем логарифм их отношения, получим так называемый *логарифмический декремент затухания*, который с учетом решения уравнения (3.3) равен:

$$\delta = \ln \frac{x_1}{x_2} = \ln \frac{A \cdot \exp(-\alpha \cdot t_1) \cdot \sin(\varpi \cdot t_1 + \varphi)}{A \cdot \exp(-\alpha \cdot t_2) \cdot \sin(\varpi \cdot t_2 + \varphi)} = \alpha(t_2 - t_1) = \alpha T.$$

Через логарифмический декремент затухания можно найти коэффициенты затухания

$$\alpha = \delta / T \quad \text{и} \quad \kappa = 2m\alpha. \quad (3.5)$$

При землетрясении маятник колеблется относительно станины и прочерчивает (записывает) пером перемещения груза относительно станины, то есть выдает график $x(t)$ - механическое решение уравнения (3.2). На неподвижном носителе и шаровом шарнире эти графики (сейсмограммы) выглядят как круговые диаграммы (рис. 3.3, а), а при подвижном носителе и цилиндрическом шарнире как линейные графики по составляющим перемещений (рис. 3.3, б).

На круговых диаграммах можно надежно фиксировать только максимальные отклонения маятника - x_{max} , а с помощью линейных графиков (сейсмограмм) можно определить изменения компонентов перемещений во времени и величины перемещений как длину вектора с компонентами по направлению стран света.

Приборы, записывающие сейсмограммы на подвижный линейный носитель, должны иметь устройства для запуска механизма перемещения носителя, которое осуществляется первым толчком. В них теряется запись начала землетрясений и поэтому основное оборудование сейсмических станций составляют маятниковые приборы с неподвижным носителем (например, закопченным стеклом и иглой или фотобумагой и лучом света).

Ввиду того, что маятники реагируют (резонируют) на колебания с периодом близким к периоду их собственных колебаний, сейсмическая станция, оборудованная системой маятников⁴, может выдать максимальные значения перемещений, соответствующих собственным частотам маятников, и логарифмическим декрементом затухания.

Если по оси абсцисс отложить периоды свободных колебаний маятников, а по оси ординат - максимальные отклонения в перемещениях (или максимальную удельную нагрузку на груз в масштабе ω^2 , см. формулу (3.1)), то получим так называемые спектры перемещений (или удельных

⁴ В России используются маятниковые сейсмографы А.Г. Назарова.

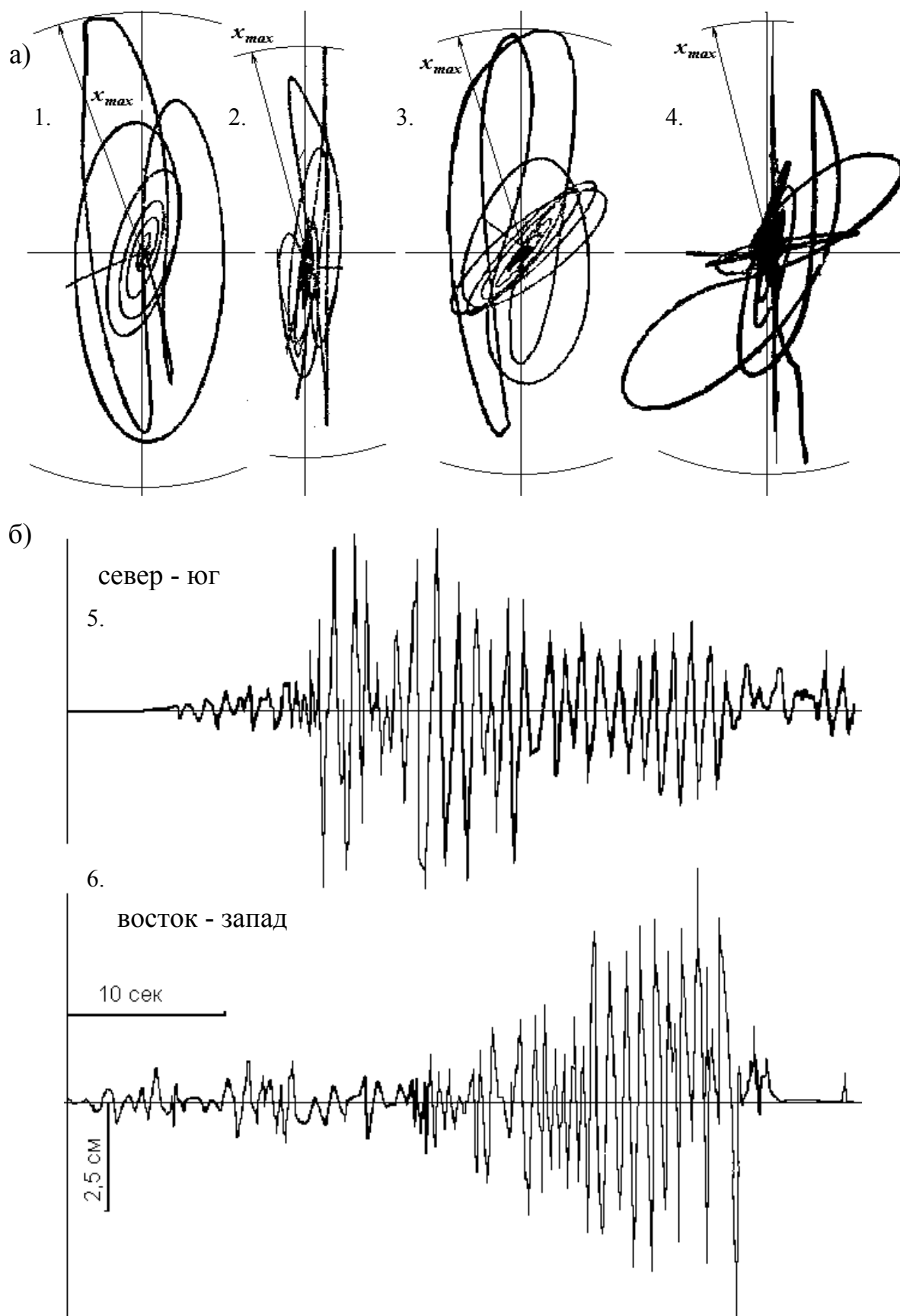


Рис. 3.3. Сейсмограммы землетрясений
на неподвижном носителе (а) и на подвижном линейном носителе (б);
1, 2, 3, 4 - круговые диаграммы; 5, 6 - линейные диаграммы

нагрузок) при заданной степени затухания. Этот график характеризует зарегистрированное землетрясение.

Если же построить огибающую этих спектров в одной точке наблюдений на земной поверхности и экстраполировать на период, связанный со сроком службы сооружений, то получим расчетный спектр землетрясений, характеризующий данную точку на земной поверхности.

Впервые спектр удельных нагрузок построил в 1934 г. М. Био (Biot M.A., 1897 - 1958) (рис. 3.4), который предложил считать его расчетной характеристикой землетрясений.

В России обработку записей сильных землетрясений и построение спектральных кривых провели И.Л.Корчинский и С.В.Медведев. Их спектр (рис. 3.5) уточнялся в течение последних десятилетий и в настоящее время спектры (рис. 3.6) закреплены в действующих нормах. Оказалось, что для одного и того же района спектр зависит также от категории грунтов, на которых находится сейсмограф (категория грунта по сейсмическим свойствам приведена в табл. 3.2).

Вид спектра, принятый в настоящее время в России, не зависит от интенсивности землетрясений и представляет собой кривую, составленную из трех участков: на первом (при малых периодах - больших частотах колебаний маятника) спектр имеет постоянное значение, на втором - изменяется по гиперболе, на третьем - также имеет постоянное значение, равное 0.8 (рис.3.6).

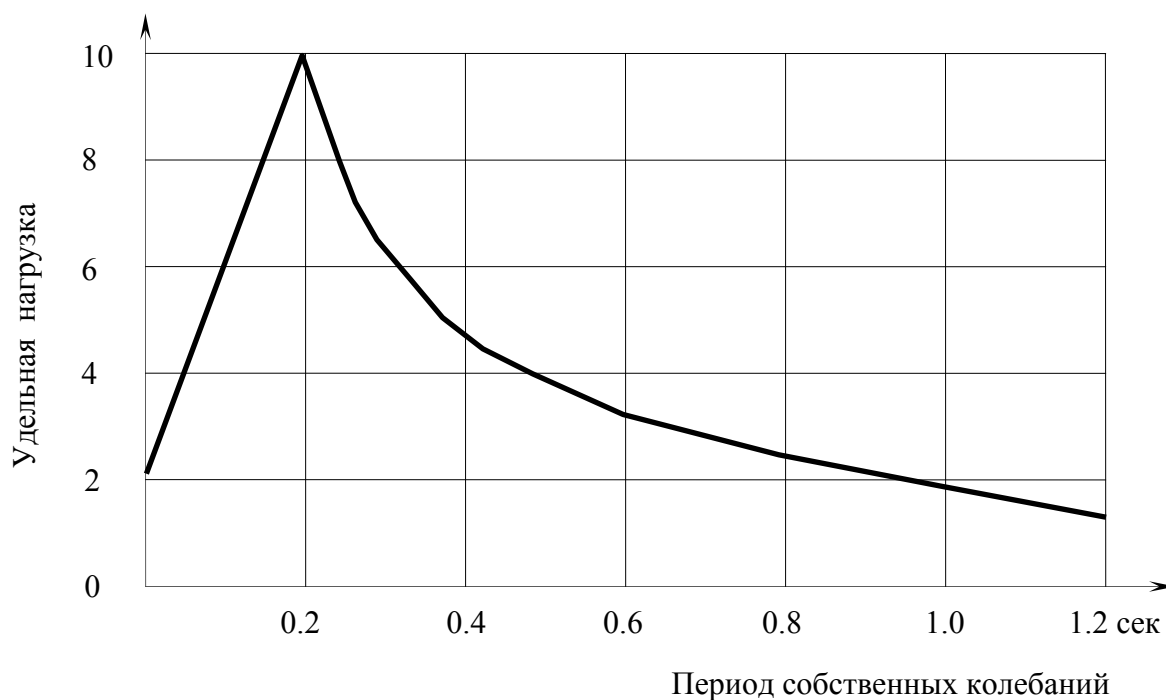


Рис. 3.4. Спектральная кривая М. Био (Biot M.A., 1934)

ца 3.2

Категория грунта по сейсмическим свойствам

Категория грунтов	Описание и виды грунтов
Грунты первой категории (плотные)	Скальные грунты всех видов (в том числе вечномерзлые и вечномерзлые - оттаявшие) неветрелые и слабоветрелые; крупнообломочные грунты плотные маловлажные из магматических пород, содержащие до 30% песчано-глинистого заполнителя; выветрелые и сильно выветрелые скальные и нескальные твердомерзлые; вечно мерзлые грунты при температуре - 2°C и ниже при строительстве и эксплуатации по принципу сохранения грунтов основания в мерзлом состоянии.
Грунты второй категории (средней плотности)	Скальные грунты выветрелые и сильно выветрелые, в том числе вечномерзлые и крупнообломочные грунты, не отнесенные к первой категории; пески гравелистые, крупные и средней крупности плотные и средней плотности маловлажные и влажные; пески мелкие и пылеватые плотные и средней плотности маловлажные; глинистые грунты с показателем консистенции до 0.5 при коэффициенте пористости до 0.9 - для глин и суглинков и до 0.7 для супесей, вечномерзлые нескальные грунты пластично мерзлые сыпучемерзлые, а также твердомерзлые при температуре выше минус 2°C при строительстве и эксплуатации по принципу сохранения грунтов основания в мерзлом состоянии.
Грунты третьей категории (рыхлые)	Пески рыхлые независимо от влажности и крупности; пески гравелистые, крупные и средней крупности плотные и средней плотности водонасыщенные пески мелкие и пылеватые плотные и средней плотности влажные и водонасыщенные; глинистые грунты с показателем консистенции свыше 0.5; глинистые грунты с показателем консистенции до 0.5 при коэффициенте пористости более 0.9 - для глин и суглинков и более 0.7 - для супесей, вечномерзлые нескальные грунты пластично мерзлые сыпучемерзлые, а также вечномерзлые нескальные при строительстве и эксплуатации по принципу оттаивания грунтов основания.
<p>П р и м е ч а н и е: 1. В случае неоднородного состава грунты относят к более высокой категории, если в пределах 10-метрового слоя грунта имеется грунт, суммарная мощность которого равна 5 м, то весь слой относится к этой категории;</p> <p>2. При прогнозировании подъема уровня грунтовых вод и обводнения грунтов в процессе эксплуатации сооружений категорию грунта следует определять в зависимости от свойств грунта (влажности, консистенции) в замоченном состоянии;</p> <p>3. При отсутствии данных о консистенции или влажности глинистые и песчаные грунты при положении уровня грунтовых вод выше 5 м относятся к третьей категории.</p>	

Ввиду недостаточности наблюдений и малой плотности сети сейсмических станций И.Л. Корчинский предложил привязать спектры к существующей сейсмической шкале интенсивности землетрясений, которая определяется не только инструментально, но и по косвенным данным (по геологическому строению земной коры, по описанию прошедших землетрясений и другим факторам). Землетрясениям 5, 6, 7, 8 и 9 баллов приписаны максимальные удельные сейсмические нагрузки, возможные в определенный период времени (см. табл. 3.3).

Приводимая ниже карта районирования (рис. 3.7), построена для Дальневосточного региона не только по инструментальным данным, но и по сведениям о геологическом строении земной коры.

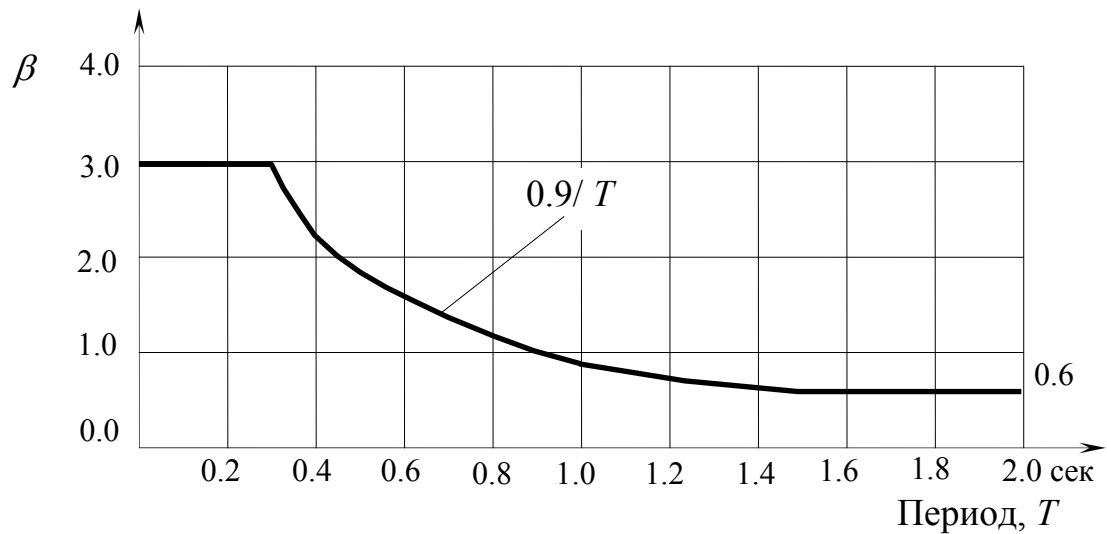


Рис. 3.5. Спектральный коэффициент β - изменения удельной нагрузки в зависимости от периода собственных колебаний, не зависящий от интенсивности землетрясения по Медведеву и Корчинскому (СНиП II-A.12-69*, Москва, 1977)

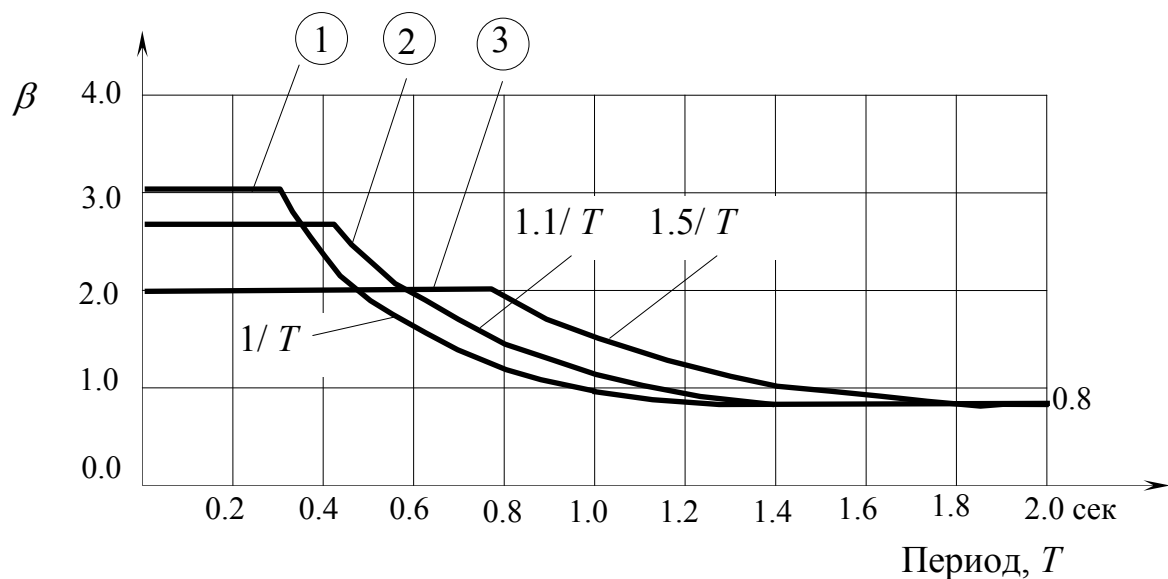


Рис. 3.6. Спектральный коэффициент β - изменения удельной нагрузки в зависимости от периода собственных колебаний и категории грунтов

1 - грунты первой категории, 2 - грунты второй категории, 3 - грунты третьей категории

Имея данные о периоде собственных колебаний, массе объекта (маятника) - m , категории грунтов и интенсивности землетрясения в заданном районе, по удельной нагрузке \bar{g} можно определить максимальную сейсмическую силу, приложенную к объекту:

$$S = m \cdot g \cdot \bar{s} \cdot \beta(T) \quad (3.7)$$

Таблица 3.3

Максимальные относительные (в долях от $g = 9.81 \text{ м/с}^2$) удельные сейсмические нагрузки ($\bar{s} = \frac{\omega^2 \cdot x}{g}$), приписываемые наиболее сильным землетрясениям в районах с заданной интенсивностью (балл.), возможные для площадки с грунтами второй категории ⁵

Наиболее сильные землетрясения, возможные в период времени	Интенсивность землетрясения в баллах				
	5	6	7	8	9
свыше 100 лет	0.025	0.050	0.100	0.200	0.400
от 100 до 50 лет	0.006	0.012	0.025	0.050	0.100
от 50 до 20 лет	0.005	0.006	0.012	0.024	0.048
менее 20 лет	-	-	-	0.010	0.020

П р и м е ч а н и е: Сейсмичность районов, приводимая в таблице, относится к районам с грунтами второй категории. Интенсивность землетрясения в грунтах первой категории уменьшается на балл, а в грунтах третьей категории увеличивается на балл.

П р и м е р 3.1. Определить максимальную нагрузку, возможную один раз в 50 лет на объект, имеющий массу $m = 120 \text{ кг}$, с периодом собственных колебаний $T = 0.6 \text{ с.}$, на плотных пылеватых и маловлажных песчаных грунтах в районе с возможной сейсмичностью 7 баллов.

Р е ш е н и е. Грунты по сейсмическим свойствам относятся ко второй категории (табл. 3.2), для которых удельная нагрузка, возможная один раз в 50 лет, равна при 7-балльном землетрясении $\bar{s} = 0.025$ (табл. 3.3). По графику на рис. 3.6 найдем величину спектрального (динамического) коэффициента:

$$\beta = 1/T = 1/0.6 = 1.67.$$

По формуле (3.7) найдем нагрузку:

$$S = m \cdot g \cdot \bar{s} \cdot \beta(T) = 120 \cdot 9.81 \cdot 0.025 \cdot 1.67 = 49.15 \text{ Н.}$$

⁵ В СНиП вычисление значения удельной сейсмической нагрузки завуалировано и устанавливается перемножением коэффициентов K_I , K_ϕ , учитывающих ответственность и допустимые повреждения сооружений и A – коэффициента, значение которого принимается равным 0.1, 0.2, 0.3 для расчетной сейсмичности 7, 8, 9 баллов. В нашей интерпретации удельная сейсмическая нагрузка связывается со сроком службы и, следовательно, ответственностью сооружений.

Пример 3.2. (для самостоятельного решения). Определить максимальную нагрузку, возможную один раз в 20 лет на объект массой 60 тонн, находящийся на мелких водонасыщенных песках. Частота собственных колебаний - четыре колебания в секунду. Объект расположен в г. Магадане.

В приведенных примерах принято среднее значение логарифмического декремента затухания, равное $\delta = 0.18$. При меньшем или большем значении δ спектральный коэффициент β должен быть увеличен или уменьшен с помощью множителя, формулы для вычисления которого приведены в табл. 3.4.

Таблица 3.4

Формула вычисления множителя для изменения спектрального коэффициента β в зависимости от логарифмического декремента затухания δ^6

при δ	Множитель изменения β	при δ	Множитель изменения β	при δ	Множитель изменения β
до 0.1	1.5	от 0.1 до 0.2	$1.5 - 6 \cdot (\delta - 0.1)$	от 0.2	$0.9 - 1.3 \cdot (\delta - 0.2)$

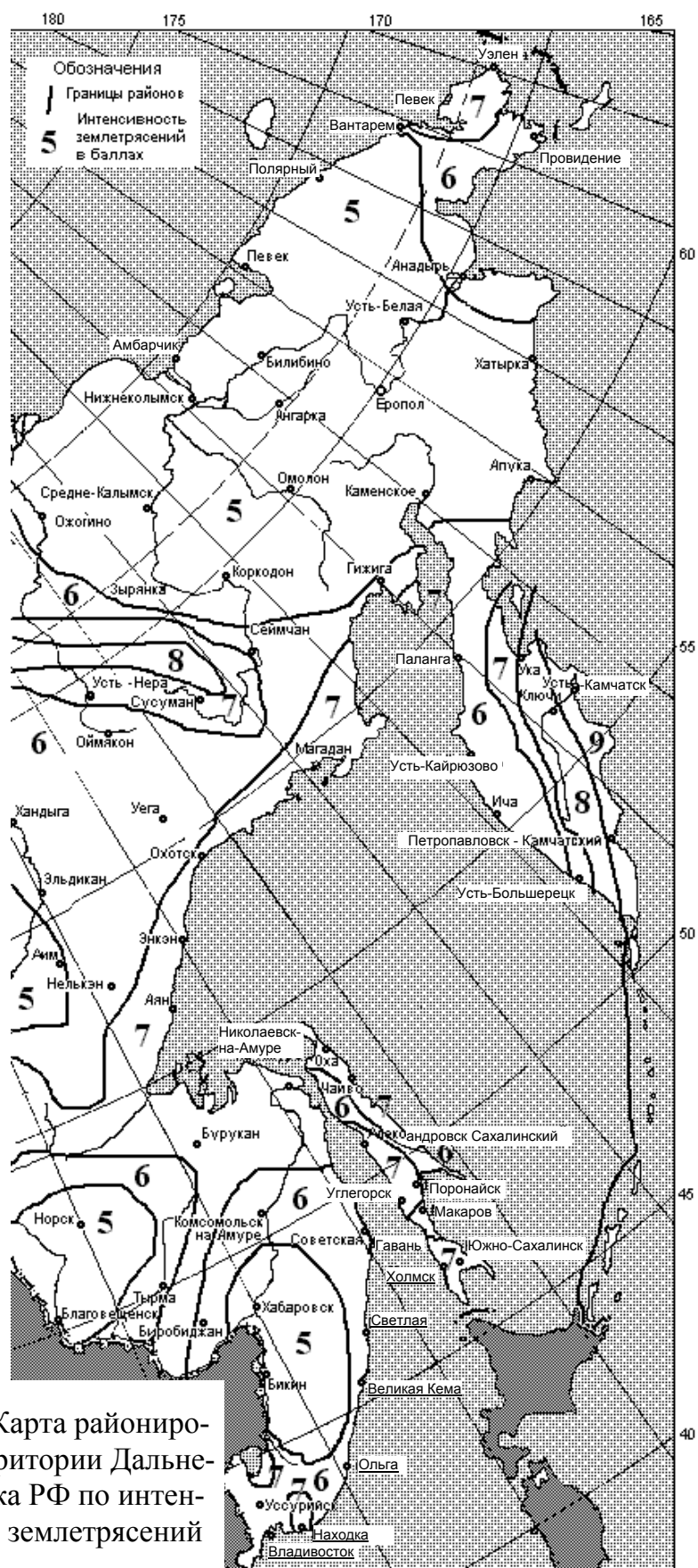
3.2. Передача сейсмического возбуждения зданию

Механизм передачи сейсмического возбуждения зданию можно представить в следующем виде. Часто участок поверхности, на котором возводится здание, относительно мал по сравнению с размерами охватываемой землетрясением поверхности земли и длиной волн распространяемых по поверхности⁷, поэтому введем допущение о том, что здание находится в точке на жесткой платформе. Вращением такой малой площадки будем пренебрегать и будем считать, что площадка поверхности земли, на которой находится сооружение, совершает лишь поступательные движения.

Характер поступательных движений зависит от положения площадки относительно очага землетрясения (гипоцентра) или относительно эпицентра - точки на поверхности земли над очагом.

⁶ В СНиП степень затухания учитывается коэффициентом K_z , с помощью которого принимаются во внимание конструктивные решения зданий.

⁷ Такое относительно жесткое допущение и построенную на ее основе теорию называют допущением и теорией точечных сооружений. Принципиально теория протяженных сооружений от нее не отличается, но имеются вычислительные трудности, которые обычно решаются с помощью современных вычислительных средств.



Если эта площадка находится в эпицентре, то продольные (вертикальные) волны достигают поверхности земли быстрее и сооружение начинает двигаться вертикально. Затем приходят и поперечные волны, которые вынуждают сооружение двигаться и горизонтально.

Если площадка находится вдали от эпицентра, то и продольные (вдоль луча, соединяющего гипоцентр с площадкой) и поперечные волны (поперек этого луча) вызовут и вертикальные, и горизонтальные движения (рис. 3.8).

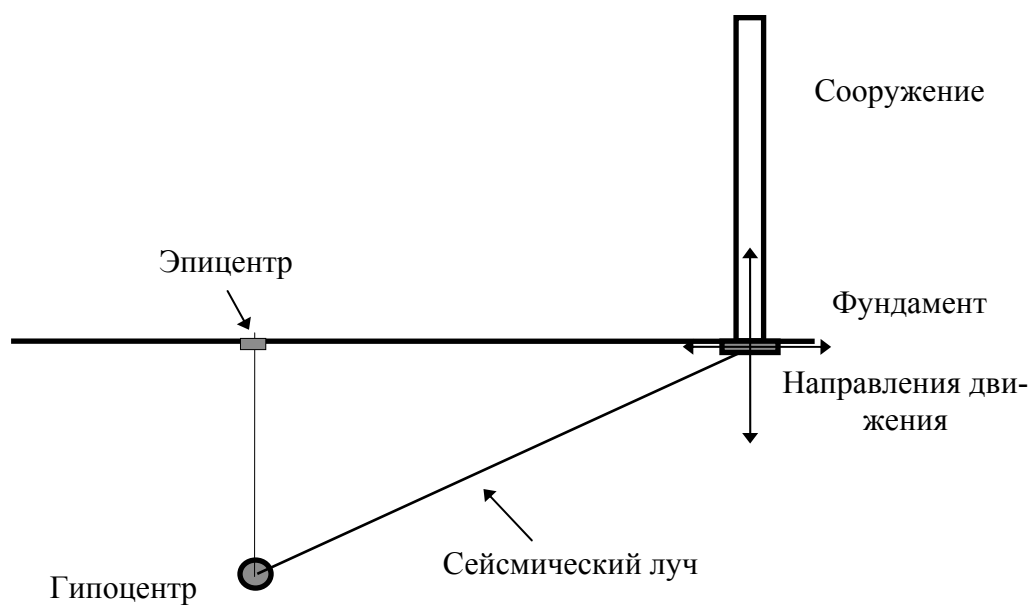


Рис. 3.8. Схема передачи сейсмического возбуждения

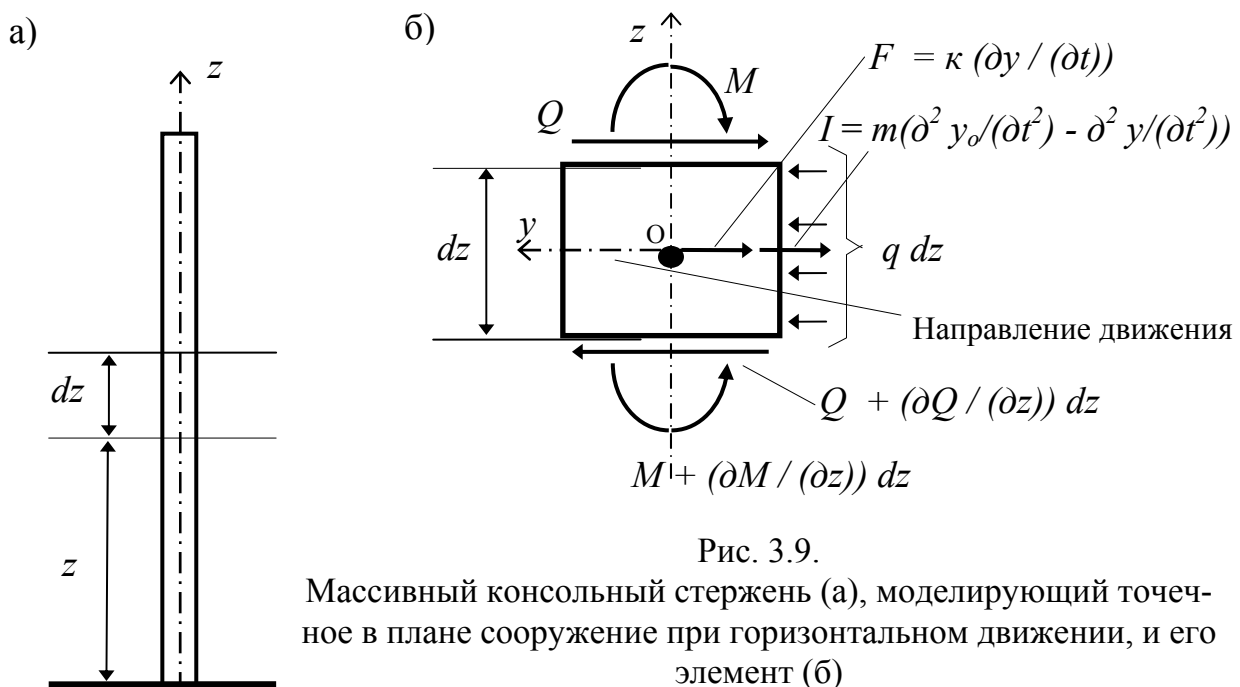
Как показала практика и специально поставленные эксперименты, основную опасность при землетрясениях представляют горизонтальные смещения. Вертикальную составляющую необходимо учитывать при проектировании:

- горизонтальных и наклонных консольных конструкций;
- пролетных строений мостов;
- рам, арок и ферм в конструкциях, имеющих горизонтальный пролет 24 метра и более;
- сооружений, имеющих возможность опрокинуться или сдвинуться при действии вертикальных сил;
- каменных конструкций (направление вертикальных движений принимается невыгодным для сохранения тех или иных эксплуатационных качеств сооружений).

3.3. Уравнения сейсмического движения сооружения, точечного в плане

В связи с тем, что точечное в плане сооружение находится на жесткой платформе, а сейсмическое воздействие передается через фундамент, являющийся точкой на поверхности земли, то на произвольную точку консольного сооружения, находящегося в инерционной среде с возбуждением, передаваемым через фундамент, будет действовать нагрузка, определяемая по формуле Лаппо - Морисона через параметры движения⁸:

- ускорение движения фундамента - \ddot{y}_0 ;
- ускорение движения сооружения относительно фундамента - \ddot{y} ;
- скорости движения сооружения относительно фундамента - \dot{y} ;



Будем рассчитывать сооружение по упрощенной расчетной схеме (см. главу 1) и представим точечное сооружение как консольный стержень с распределенной массой⁹.

В дифференциальной постановке уравнение движения, представляющее собой условие равновесия малого элемента под действием нагрузки в инерционной среде будет иметь вид¹⁰:

⁸ Уравнение движения совпадает с уравнением, выведенным ранее в главе 2, но произведена замена обозначения перемещения на y вместо w . Для того чтобы не путались перемещения и традиционное – нормируемое обозначение ветровой нагрузки.

⁹ Присутствие сосредоточенных масс не вносит изменений в получаемые ниже результаты (см. дополнения к настоящему приложению).

¹⁰ Более сложные (неконсольные) сооружения имеют более сложный дифференциальный оператор, зависящий от координат. Но путь решения задачи не отличается от приводимого ниже.

$$EI \frac{\partial^4 y}{\partial z^4} = -m(\ddot{y}_0 + \ddot{y}) - \kappa \dot{y},$$

или после переноса в левую часть неизвестных перемещений сооружения относительно фундамента и соответствующих производных будем иметь уравнение

$$EI \frac{\partial^4 y}{\partial z^4} + m \cdot \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} + \kappa \cdot \frac{\partial y}{\partial t} = -m \cdot \frac{\partial^2 y_0}{\partial t^2}, \quad (3.9)$$

совпадающее с уравнением вынужденных колебаний стержня¹¹ при нагрузке $q(t) = -m \cdot \ddot{y}_0$.

Решение уравнения (3.9) будем искать в виде ряда

$$y(z, t) = \sum_{i=1}^{\infty} m \cdot y_i(z) \cdot \Phi_i(t), \quad (3.10)$$

предварительно разложим нагрузку по формам колебаний

$$q(z, t) = -m \cdot \ddot{y}_0 = \sum_{i=1}^{\infty} m \cdot y_i(z) \cdot q_i(t), \quad (3.11)$$

$$\text{где } q_i(t) = -\frac{\int_0^l m \cdot \ddot{y}_0 \cdot y_i \cdot dz}{\int_0^l m \cdot y_i^2 \cdot dz} = -\ddot{y}_0 \cdot \eta_i \text{ и } \eta_i = \frac{\int_0^l m \cdot y_i \cdot dz}{\int_0^l m \cdot y_i^2 \cdot dz}.$$

После подстановки одного из членов ряда (3.10) и (3.11) в (3.9) и деления на произведение $m \cdot y_i \cdot \Phi_i$ получим равенство, каждый элемент которого не зависит от координаты и от времени, то есть, равен постоянной величине - ω_i .

$$EI \frac{1}{m \cdot y_i} \cdot \frac{d^4 y_i}{dz^4} = -\frac{\frac{d^2 \Phi_i}{dt^2} + \frac{\kappa}{m} \cdot \frac{d\Phi_i}{dt} - q_i}{\Phi_i} = -\omega_i^2. \quad (3.12)$$

Приравняв каждую часть уравнения (3.12) постоянной величине, получим систему из двух уравнений (3.13):

¹¹ Уравнение вынужденных колебаний см. в главе 2. В нем необходимо поменять обозначение (w заменить на y).

$$\left. \begin{aligned} EI \frac{d^4 y_i}{dz^4} - m \cdot \omega_i^2 y_i &= 0, \\ \omega^2 \Phi_i &= -\eta_i \cdot \ddot{y}_0 - \ddot{\Phi}_i - 2\alpha_i \cdot \dot{\Phi}_i, \\ \ddot{\Phi}_i + 2\alpha_i \cdot \dot{\Phi}_i + \omega^2 \Phi_i &= -\eta_i \cdot \ddot{y}_0 \end{aligned} \right\} \quad (3.13)$$

$(\alpha = \kappa / 2m).$

Первое из них представляет собой однородное уравнение. Ненулевым решением его являются формы колебаний соответствующие частоте (ω_i^2), при которой возможно это ненулевое решение. Второе уравнение в системе уравнений (3.13), которое называют временным, по виду и решению точно совпадает с уравнением (3.2), если в нем заменить \ddot{x}_0 на $\eta_i \cdot \ddot{y}_0$, а x на Φ_i . Такое совпадение говорит о том, что записи землетрясений маятником с коэффициентом затухания, равным коэффициенту затухания сооружения, и с частотой, равной по величине одной из частот его собственных колебаний, дадут график изменения функции Φ_i . Следовательно, по записям землетрясений при неподвижном носителе можно найти максимальное отклонение $\Phi_{i \max}$:

$$\Phi_{i \max} = \frac{1}{\omega_i^2} \eta_i \cdot g \cdot \bar{s} \cdot \beta(T_i).$$

3.4. Вычисление сейсмических сил (сейсмической нагрузки). Спектральная методика

Нагрузку в инерционной среде от сейсмического воздействия определим по формуле Лаппо – Морисона

$$S = -m(\ddot{y}_0 + \ddot{y}) - \kappa \dot{y},$$

которая с учетом разложений (3.10) и (3.11) примет вид ($\kappa = 2m\alpha$)

$$S = -\sum_{i=1}^{\infty} m \cdot (\eta_i \cdot \ddot{y}_0 \cdot y_i + y_i \cdot \ddot{\Phi}_i) - \sum_{i=1}^{\infty} 2\alpha \cdot m \cdot y_i \cdot \dot{\Phi}_i$$

или (с учетом временного уравнения в (3.13)):

$$S = -\sum_{i=1}^{\infty} m \cdot y_i (\eta_i \cdot \ddot{y}_0 + \ddot{\Phi}_i + 2\alpha_i \cdot \dot{\Phi}_i).$$

С учетом последнего равенства в (3.13): $\eta_i \cdot \ddot{y}_0 + \ddot{\Phi}_i + 2\alpha_i \cdot \dot{\Phi}_i = -\omega_i^2 \Phi_i$.

$$S = \sum_{i=1}^{\infty} S_i = \sum_{i=1}^{\infty} m \cdot y_i \cdot \omega_i^2 \cdot \Phi_i.$$

Учитывая замеченное выше совпадение уравнений движения маятника сейсмографа и временного уравнения колебания сооружения можно найти максимальное значение нагрузки соответствующее одной частоте - ω_i (или периоду $T_i = 2 \cdot \pi / \omega_i$) по формуле (3.7):

$$S_{i \max} = m \cdot y_i \cdot \omega_i^2 \cdot \Phi_{i \max} = m \cdot y_i \cdot \eta_i \cdot g \cdot \bar{s} \cdot \beta(T_i), \quad (3.14)$$

где m - масса сооружения, $g = 9.81 \text{ м/с}^2$ - ускорение силы тяжести, y_i - координаты формы колебаний соответствующие частоте ω_i ,

$$\eta_i = \frac{\int_0^l m \cdot y_i \cdot dz}{\int_0^l m \cdot y_i^2 \cdot dz}, \quad \bar{s} - \text{удельная сейсмическая нагрузка (табл. 3.3), зависящая от}$$

ответственности, срока службы и допускаемых повреждений сооружений, которая определяется интенсивностью землетрясения в районе строительства (в баллах), и расчетным периодом времени, который связан с ответственностью сооружений и их сроком службы (см. табл. 3.5), $\beta(T_i)$ или β_i - спектральный (динамический) коэффициент, величина которого зависит от периода и степени затухания (рис. 3.6 и табл. 3.4).

Ориентировочные логарифмические декременты затухания (суммарные коэффициенты диссипации¹²) приведены в табл. 3.6.

При существующей системе наблюдений и принятой методике районирования мы можем получить только максимальные сейсмические силы, соответствующие каждой форме колебаний. Такую методику вычисления сейсмических сил называют *спектральной*.

В спектральной методике существует проблема суммирования максимальных сил, соответствующих каждой форме колебаний, и получения расчетной сейсмической нагрузки. Здесь существует множество подходов, предлагаемых авторами на основе в той или иной степени обоснованных предложений.

¹² Диссипация - (анг. dissipate – рассеивать, разгонять) - затухание за счет сопротивления инерционной среды, включая и внутреннее сопротивление.

3.5. Расчетная сейсмическая нагрузка.

Принципы суммирования максимальных сейсмических сил, посчитанных по спектральной методике

Ниже мы разберем три принципиально различных предложения российских специалистов о суммировании максимальных сейсмических сил.

Методика *С.В. Медведева* основывается на предположении, что сопротивление движению сооружения в инерционной среде мало и возможно, что максимальные силы, соответствующие разным частотам появятся одновременно.

Таблица 3.5

Расчетный период времени, определяющий относительные удельные сейсмические нагрузки для зданий и сооружений

Класс	Допускаемые повреждения зданий и сооружений	Коэффициент K_1 по СНИП Расчетный период времени
1	Сооружения, в которых остаточные деформации и локальные повреждения (осадки, трещины и т.п.) не допускаются (атомные станции, химические заводы, крупные гидротехнические и военные объекты, сооружения связи)	$\frac{1.0}{\text{свыше 100 лет}}$
2	Здания и сооружения, в конструкциях которых могут быть допущены остаточные деформации, трещины, повреждения отдельных элементов, затрудняющие нормальную эксплуатацию, при обеспечении безопасности людей и сохранность оборудования (жилые, общественные, производственные здания и сооружения, гидротехнические и транспортные сооружения, системы энергоснабжения, водоснабжения, пожаротушения)	$\frac{0.25}{\text{от 100 до 50 лет}}$
3	Здания и сооружения, в конструкциях которых могут быть допущены значительные остаточные деформации, трещины, повреждения отдельных элементов, их смещения, временно приостанавливающие нормальную эксплуатацию при обеспечении безопасности людей (одноэтажные производственные и сельскохозяйственные здания, не содержащие ценного оборудования)	$\frac{0.12}{\text{от 50 до 20 лет}}$
4	Здания и сооружения, разрушение которых не связано с гибелью людей, порчей ценного оборудования и не вызывает прекращения непрерывных производственных процессов (склады, крановые и ремонтные эстакады, малые мастерские и др.), а также временные здания и сооружения	$\frac{0.00}{\text{менее 20 лет}}$

П р и м е ч а н и е: В сооружениях второго класса выделяются:

- Особо ответственные здания и сооружения, связанные со значительными жертвами и материальными потерями ценного оборудования, для которых расчетная относительная удельная нагрузка увеличивается в два раза (на 100%);
- Здания и сооружения, повреждение которых связано с особенно тяжелыми последствиями (вокзалы, крытые стадионы и т.п.) - расчетная относительная удельная нагрузка увеличивается в полтора раза (на 50%);
- Здания и сооружения, функционирование которых необходимо при ликвидации последствий землетрясений (системы энерго и водоснабжения, пожарные депо, системы пожаротушения, государственные и региональные системы связи) - расчетная относительная удельная нагрузка увеличивается на 20%.

Таблица 3.6

Параметры затухания зданий и сооружений

Характеристика конструкций и конструктивные решения зданий	Логарифмический декремент затухания
1. Высотные сооружения небольших размеров в плане (башни, мачты, дымовые трубы, отдельно стоящие шахты лифтов и т.п.).	до 0.1
2. Здания с одним или несколькими каркасными нижними этажами и вышележащими этажами с несущими стенами, диафрагмами или каркасом с заполнением, если заполнение в нижних этажах отсутствует или незначительно влияет на жесткость.	до 0.1
3.1. Каркасные здания, стеновое заполнение которых не оказывает влияния на его деформативность при отношении высоты стоек к поперечному размеру в направлении действия расчетной сейсмической нагрузки, равном или более 25.	0.1
3.2. Каркасные здания, стеновое заполнение которых не оказывает влияния на его деформативность при отношении высоты стоек к поперечному размеру в направлении действия расчетной сейсмической нагрузки, равном или менее 15.	0.2
4.1. Здания каркасные, крупноблочные, со стенами комплексной конструкции с числом этажей более 10.	0.1
4.2. Здания каркасные, крупноблочные, со стенами комплексной конструкции с числом этажей менее 5.	0.2
5.1. Здания крупнопанельные или со стенами из монолитного железобетона с числом этажей свыше 12.	0.1
5.2. Здания крупнопанельные или со стенами из монолитного железобетона с числом этажей менее 5.	0.2
6. Здания с несущими стенами из кирпичной или каменной кладки, выполненными вручную без добавок, повышающих сцепление.	0.13
7. Каркасные здания, высота которых до низа балок или ферм не более 8 м с пролетом до 18 м.	0.28
8. Сельскохозяйственные здания на сваях-колоннах, возводимые на грунтах третьей категории по сейсмостойкости.	0.5
9. Здания и сооружения, не указанные в позициях 1-8.	0.18
<p>П р и м е ч а н и е: 1. Значения логарифмического декремента затухания допускается уточнить или определить по результатам экспериментов;</p> <p>2. В позициях 3 - 5 при промежуточных значениях параметров (отношения высоты стоек к поперечному размеру в направлении действия расчетной сейсмической нагрузки, или числа этажей) логарифмический декремент затухания вычисляется по интерполяции.</p>	

С.В. Медведев предложил находить нагрузку геометрическим суммированием:

$$S = \sqrt{\sum_{i=1}^{\infty} S_i^2} \quad (3.15)$$

или ввиду того, что силы, соответствующие первой частоте дают наибольший вклад в расчетную сейсмическую нагрузку, то вычислять расчетную сейсмическую нагрузку с вероятностью совпадения с первой частой равной 50%, то есть:

$$S = \sqrt{S_1^2 + 0.5 \sum_{i=2}^{\infty} S_i^2} . \quad (3.16)$$

Л.И. Корчинский, наоборот, считает, что внутреннее сопротивление движению зданий велико, и оно должно быть рассчитано на максимальную нагрузку, соответствующую только одной частоте колебаний (чаще всего первой), то есть нагрузки действуют независимо друг от друга.

А.Г. Назаров исходит из того, что основная часть сейсмической нагрузки определяется первыми одной, двумя или тремя частотами и формами колебаний, соответствующими низким частотам или большим периодам. Кроме того, он в своей методике использует особенность спектральной кривой (см. рис. 3.6), которая в начале - до некоторого периода колебаний T_o - постоянна и равна β_o .

Если наибольший период (период первой формы колебаний) меньше T_o , то остальные периоды и того меньше, поэтому для всех частот и форм колебаний $\beta = \beta_o$ и сумма сейсмических сил в точке k равна

$$S_k = \sum S_{ik} = \bar{s} \cdot \beta_o \cdot m \cdot g \cdot \sum \eta_i \cdot y_{ik} ,$$

но так как $\sum \eta_i \cdot y_{ik} = 1$

$$S_k = \bar{s} \cdot \beta_o \cdot m \cdot g \quad (3.17)$$

Таким образом, сейсмическая сила прикладывается статически с коэффициентом динамичности $\beta = \beta_o$. Такие сооружения считаются *жесткими*.

Если наибольший период (период первой формы колебаний) больше $T_1 > T_o$, а остальные периоды меньше его, то для всех частот и форм колебаний кроме первой $\beta = \beta_o$ и сумма сейсмических сил в точке k равна

$$\begin{aligned} S_k &= S_{1k} + \sum_{i>1} S_{ik} = \bar{s} \cdot m \cdot g (\beta_1 \cdot \eta_1 \cdot y_{1k} + \beta_o \sum_{i>1} \eta_i \cdot y_{ik}) = \\ &= \bar{s} \cdot m \cdot g \cdot (\beta_1 \eta_1 \cdot y_{1k} + \beta_o (1 - \eta_1 \cdot y_{1k})). \end{aligned} \quad (3.18)$$

Такие сооружения считаются *гибкими*.

Если два наибольших периода (период первой и второй форм колебаний) больше $T_1 > T_2 > T_o$, а остальные периоды меньше его, то для всех частот и форм

колебаний кроме первых двух $\beta = \beta_o$, поэтому сумма сейсмических сил в точке k равна

$$S_k = S_{1k} + S_{2k} + \sum_{i>3} S_{ik} = \bar{s} \cdot m \cdot g(\beta_1 \cdot \eta_1 \cdot y_{1k} + \beta_2 \cdot \eta_2 \cdot y_{2k} + \beta_o(1 - \eta_1 \cdot y_{1k} - \eta_2 \cdot y_{2k})). \quad (3.19)$$

Такие сооружения считаются *гибкими*.

Если три наибольших периода (период первой, второй и третьей форм колебаний) больше $T_1 > T_2 > T_3 > T_o$, а остальные периоды меньше его, то для всех частот и форм колебаний кроме первых трех $\beta = \beta_o$, а сумма сейсмических сил в точке k равна

$$S_k = S_{1k} + S_{2k} + S_{3k} + \sum_{i>3} S_{ik} = \bar{s} \cdot m \cdot g(\beta_1 \cdot \eta_1 \cdot y_{1k} + \beta_2 \cdot \eta_2 \cdot y_{2k} + \beta_3 \cdot \eta_3 \cdot y_{3k} + \beta_o(1 - \eta_1 \cdot y_{1k} - \eta_2 \cdot y_{2k} - \eta_3 \cdot y_{3k})). \quad (3.20)$$

Такие сооружения считаются *чрезвычайно гибкими*.