

УДК 699.841

Особенности расчета сооружений на действия слабых частых землетрясений

А. М. Уздин, А. В. Бенин, Ш. Ш. Назарова, О. Б. Сабирова, М. С. Белашов

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Российская Федерация, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

Для цитирования: Уздин А. М., Бенин А. В., Назарова Ш. Ш., Сабирова О. Б., Белашов М. С. Особенности расчета сооружений на действия слабых частых землетрясений // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2022. — Т. 19. — Вып. 2. — С. 390–404. DOI: 10.20295/1815-588X-2022-2-390-404

Аннотация

Цель: Показать особенности расчета сооружений на действие слабых частых землетрясений. **Методы:** Численное моделирование сейсмических колебаний сооружений. Анализ предельных состояний. **Результаты:** Проанализированы особенности расчета сооружений на действие слабых землетрясений. Рассмотрены землетрясения с повторяемостью раз в 30 лет и раз в 50 лет. В первом случае после землетрясения сооружение должно работать в штатном режиме без повреждений. Во втором случае допускаются повреждения, не влияющие на возможность эксплуатации сооружения. Основное внимание уделено трем вопросам: заданию упругих и демпфирующих характеристик железобетона, формализации предельных состояний и сочетаниям нагрузок. Оценена зависимость демпфирования от степени армирования железобетона. При оценке предельных состояний кроме расчетов по трещиностойкости и прочности рассмотрена возможность исключения паники среди людей. Для ее исключения предлагается ограничивать уровень скорости в определенных октавных диапазонах. Разработаны предложения для оценки коэффициентов сочетаний различных нагрузок с сейсмической. Оценены коэффициенты сочетаний сейсмической и ледовой нагрузки. **Практическая значимость:** Установлена система расчетных коэффициентов для оценки сейсмостойкости при относительно слабых, частых воздействиях. Показано, что для сильных воздействий коэффициенты сочетаний для разных регионов оказываются близкими, а для слабых воздействий они могут сильно отличаться друг от друга.

Ключевые слова: Слабые землетрясения, частые землетрясения, предельное состояние, коэффициент армирования, трещиностойкость, прочность, коэффициент сочетаний нагрузок.

Введение

В мировой практике сейсмостойкого строительства осуществляется переход от проектирования сооружения на основе расчета на сильное

землетрясение к многоуровневому проектированию с расчетами на воздействие нескольких уровней интенсивности и в конечном итоге к проектированию сценариев накопления повреж-

дений [1]. В итальянской и французской версиях Еврокода предусмотрен расчет на четыре уровня нагрузки, соответствующих четырем предельным состояниям [2].

1. Предельное состояние нарушения эксплуатации, или SLS, имеет повторяемость раз в 30 лет. Это значит, что при воздействиях, повторяющихся чаще чем раз в 30 лет элементы сооружения работают упруго и в них не возникает никаких повреждений, а само сооружение работает в штатном режиме.

2. Предельное состояние повреждения элементов сооружения, или DLS, имеет повторяемость раз в 50 лет. Это значит, что при воздействиях с повторяемостью меньше чем раз в 50 лет могут вызвать повреждения в элементах сооружения, которые не вызовут нарушения его нормальной эксплуатации, или нарушение нормальной эксплуатации будет кратковременным.

3. Предельное состояние серьезных повреждений сооружения, или ULS, имеет повторяемость раз в 475 лет. При воздействиях с такой повторяемостью возникают повреждения объекта, нарушающие его эксплуатацию, однако объект может быть восстановлен.

4. Предельное состояние полного разрушения, или CLS, с повторяемостью раз в 975 лет. При этом объект не подлежит восстановлению.

Отметим, что российские гражданские нормы оперируют только ULS, которое может иметь повторяемость от 500 до 2000 лет. Расчеты на слабые воздействия, соответствующие DLS и SLS в России, не проводятся. Не освящены они в достаточной мере и за рубежом. Исключение составляют крупные гидротехнические сооружения (большие плотины). Для них рассматривается два предельных состояния DLS и CLS. Первое имеет повторяемость раз в 500 лет, а второе — раз в 5000 лет. При DLS допускаются определенные повреждения в сооружении, что учитывается повышением в два раза коэффициента редукции (коэффициента предельных состояний) K_1 .

Между тем расчеты для анализа DLS и SLS имеют целый ряд специфических особенностей, не отраженных в литературе. Эти особенности включают детализацию предельных состояний, расчетные схемы для упругой системы с учетом демпфирования, сочетания нагрузок.

Детализация предельных состояний

Для DLS на первый взгляд основным должно быть — нарушение условий прочности и трещиностойкости, причем анализ прочности следует проводить на нормативные нагрузки.

Как правило, эти проверки выполняются. Однако возникают другие опасные ситуации, приводящие к нарушению работы сооружения, а иногда и гибели людей.

Мы хотим выделить две группы предельных состояний такого рода:

1. Падение мебели и остальных предметов, нарушение работы оборудования.

2. Возникновение паники среди населения.

Для нормальной работы оборудования и исключения падения тяжелых предметов необходимо построение поэтажных спектров. По ним подбирается крепеж мебели и оборудования.

В качестве примера для подбора оборудования построим поэтажную акселерограмму и сейсмограмму для пятого этажа 5-этажного здания (рис. 1).

Как видно из рисунка, ускорения основания возросли с $0,175 \text{ м/с}^2$ до $0,5 \text{ м/с}^2$ и на последних этажах здания ускорения в 4 раза превосходят ускорения основания. Это говорит о том, что для обычных неизолированных зданий на слабые воздействия требуется построение поэтажных спектров ускорений и скоростей.

Для оценки опасности воздействия на людей возникает необходимость работать с поэтажными велосиграммами. Пример такой велосиграммы и поэтажного спектра ускорений для рассмотренного 5-этажного здания от акселерограммы Линкольн показан на рис. 2 и 3.

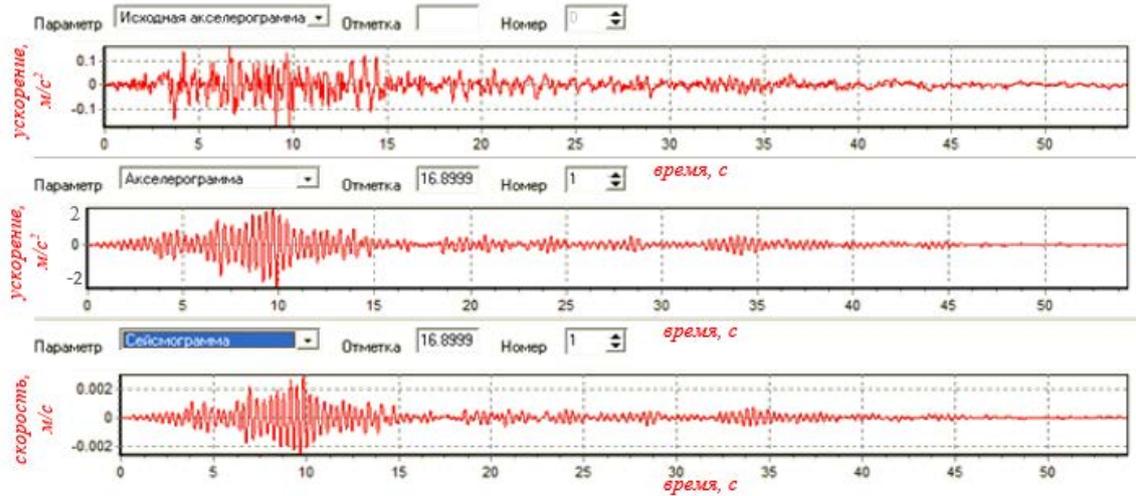


Рис. 1. Поэтажная акселерограмма и сейсмограмма для верхнего этажа 5-этажного здания

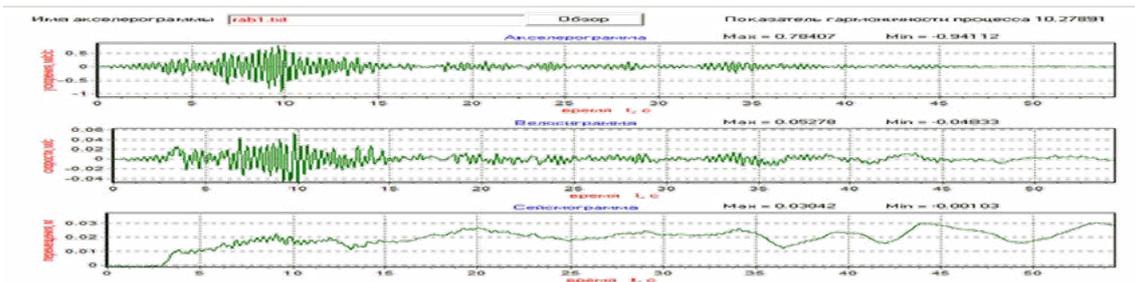


Рис. 2. Велосигнал для 5 этажа неизолированного 5-этажного здания

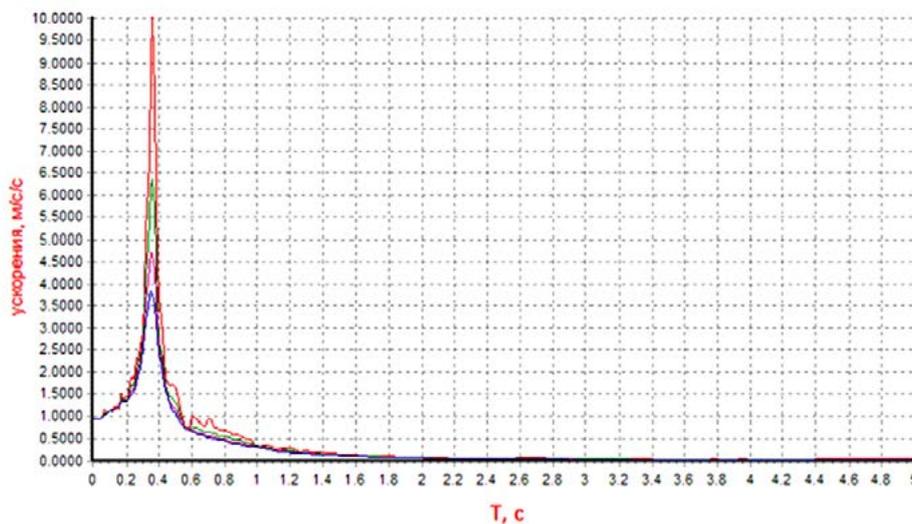


Рис. 3. Поэтажный спектр ускорений для верхнего этажа неизолированного 5-этажного здания

ТАБЛИЦА 1. Допустимые значения уровня виброскорости в дБ

Частота, Гц	1	2	4	8	16
Максимум виброскорости, дБ	117	91	82	76	75
Максимум виброскорости, мм/с	36	1,8	0,63	0,32	0,29

Для исключения паники среди жителей и посетителей культовых и зрелищных сооружений значения скоростей в определенных октавных диапазонах должны быть ограничены. Допустимый уровень виброскорости, по данным [3], составляет в диапазоне частот от 5 до 8 Гц примерно 75 дБ, а в диапазоне частот от 2 до 5 Гц около 100 дБ. На основе данных [3] можно рекомендовать допустимые значения виброскорости, приведенные в табл. 1.

Перевод виброскорости из традиционной размерности м/с в дБ осуществляется по формуле (1), рекомендованной в [4, 5].

$$V_{dB} = 20 \cdot \lg \left(\frac{V}{V_0} \right), \quad (1)$$

где V_{dB} — скорость в дБ; V — скорость в м/с; $V_0 = 5 \cdot 10^{-8}$ м/с.

Максимум виброскорости в рассмотренном примере составил 0,053 м/с или примерно 140 дБ, что превышает допустимый уровень по табл. 1.

Расчетные схемы сооружений для слабых воздействий

При расчете на слабые воздействия, соответствующие DLS и SLS, сооружение работает линейно-упруго. Это облегчает проведение инженерных расчетов и придает результатам наглядность и физический смысл. При этом упругодемпфирующие характеристики элементов конструкции и основания могут и должны быть уточнены. Здесь имеется в виду прежде всего жесткость и демпфирование элементов сооружения, а также моделирование грунтового основания.

Для металлических конструкций упругодемпфирующие характеристики описаны в [4]. При

этом затухание определяется коэффициентом неупругого сопротивления, который с некоторым запасом может приниматься равным 0,05 (2,5 % от критического значения).

Для железобетонных сооружений дела обстоят несколько сложнее. При малых колебаниях, когда в бетоне нет повреждений, арматура и бетон работают совместно. Можно принять гипотезу Е. С. Сорокина о пропорциональности потерь энергии жесткости элемента. Тогда потери энергии в железобетонном элементе описываются формулой (2):

$$\gamma = \frac{(\gamma_{concr} + 6 \cdot \varepsilon \cdot \mu \cdot \gamma_{ri})}{(1 + 6 \cdot \varepsilon \cdot \mu)}, \quad (2)$$

где γ_{concr} — коэффициент неупругого сопротивления бетона; γ_{ri} — коэффициент неупругого сопротивления арматуры; μ — коэффициент

армирования; $\varepsilon = \frac{E_{ri}}{E_{concr}}$, E_{ri} и E_{concr} — модули упругости арматуры и бетона соответственно.

При расчете жесткости по СП 14.13330.2018 в предположении, что бетон работает только на сжатие, а в растянутой зоне появляются трещины, то формула имеет ту же структуру и отличается только коэффициентом при члене, учитывающем арматуру:

$$\gamma = \frac{(\gamma_{concr} + 12 \cdot \varepsilon \cdot \mu \cdot \gamma_{ri})}{(1 + 12 \cdot \varepsilon \cdot \mu)}. \quad (3)$$

На рис. 4 приведены зависимости показателя демпфирования от степени армирования сечения.

В процессе исследований авторы проводили экспериментальные работы железобетонных балок при слабых воздействиях. Фрагмент этих

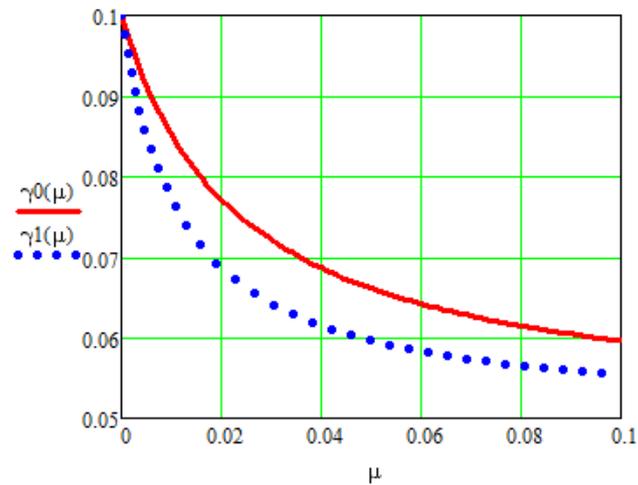


Рис. 4. Зависимость коэффициента неупругого сопротивления железобетона γ от коэффициента армирования μ : сплошная линия — упругая работа всего сечения; точечная линия — исключение работы бетона в растянутой зоне

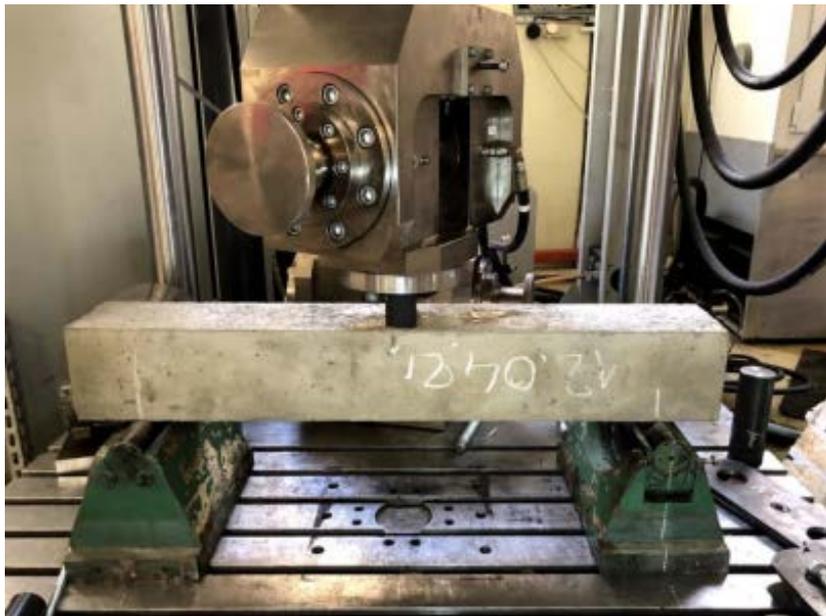


Рис. 5. Пример испытания железобетонной балки

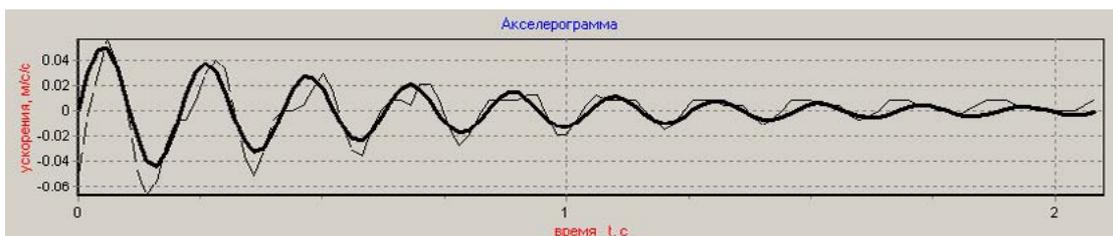


Рис. 6. Запись свободных колебаний железобетонной балки (черная сплошная кривая) и аппроксимирующая зависимость процесса колебаний (черная пунктирная кривая)

ТАБЛИЦА 2. Зависимость пиковых ускорений и расчетных баллов от ситуационной сейсмичности

Ситуационная сейсмичность	30 лет		50 лет		475 лет		975 лет	
	PGA, м/с ²	Расчетная балльность						
6-6-7	0,037	3,02	0,045	3,46	0,188	5,42	0,331	6,04
6-7-7	0,043	3,35	0,054	3,79	0,254	5,75	0,45	6,38
6-7-8	0,051	3,68	0,067	4,13	0,344	6,08	0,614	6,71
7-7-8	0,062	4,02	0,085	4,46	0,468	6,42	0,837	7,04
7-8-8	0,078	4,35	0,111	4,79	0,638	6,75	1,141	7,38
7-8-9	0,101	4,68	0,146	5,13	0,87	7,08	1,555	7,71
8-8-9	0,133	5,02	0,196	5,46	1,186	7,42	2,117	8,04
8-8-10	0,178	5,35	0,264	5,79	1,617	7,75	2,879	8,38
8-9-10	0,239	5,68	0,358	6,13	2,201	8,08	3,91	8,71
9-9-10	0,324	6,02	0,488	6,46	2,992	8,42	5,302	9,04
9-10-10	0,440	6,35	0,665	6,79	4,063	8,75	7,181	9,38
10-10-10	0,600	6,68	0,907	7,13	5,509	9,08	9,712	9,71

испытаний приведены на рис. 5. При этом записывались свободные колебания железобетонной балки на двух опорах и искалась аппроксимация записи в виде $y = a \cdot e^{-\gamma t} \cdot \sin \omega t$. На рис. 6 приведен пример такой записи и ее аппроксимации. Обработка записей указывает на коэффициент неупругого сопротивления $\gamma = 0,06-0,075$. Этот результат подтверждает высказанную гипотезу о демпфировании в железобетоне. Мы получили среднюю величину между затуханием в арматуре $\gamma = 0,03-0,05$ и бетоне $\gamma = 0,07-0,12$, приводимую в литературе.

В работе [5] показано, что упругая работа сооружения при относительно небольшом уровне нагрузки позволяет моделировать основание, используя СП 26.13330.2012 «Фундаменты под машины с динамическими нагрузками». А согласно [6], для расчета свайных фундаментов с высоким свайным ростверком можно пользоваться СП 24.13330.2011 «Свайные фундаменты», но необходимо учитывать фактический уровень расчетных ускорений, соответствующих 5–6-балльным воздействиям.

Одним из важнейших этапов создания расчетной модели сооружения является задание сейсмического воздействия. Как при использовании

записей прошлых землетрясений, так и генерации искусственных акселерограмм необходимо выбирать резонансные, опасные для сооружения воздействия. Пиковые ускорения PGA должны назначаться в соответствии со шкалой балльности [7]. Алгоритм и программа расчета PGA описаны в литературе [8]. Отметим только, что в программе [9] реализован известный подход [10], связывающий повторяемость T и силу землетрясения в баллах I зависимостью:

$$\text{Log}(T) = a \cdot I + b, \quad (4)$$

где T — повторяемость землетрясения силой I баллов; a, b — константы, характеризующие сейсмическую опасность в площадке.

В [11] указаны недостатки использования зависимости (4) и предложена другая зависимость:

$$\text{Log}(T) = 0,5 \cdot I + b. \quad (5)$$

В табл. 2 приведены значения коэффициента b для районов с различной ситуационной сейсмичностью.

Зная уровень расчетного воздействия, можно переходить к его расчетной модели. Для проведения расчетов по акселерограммам надо подбирать резонансную запись, у которой пик на спектре ускорений попадет на частоту опасной формы колебаний.

Нет вопросов и по использованию линейно-спектральной методики. Известную формулу (6) для расчета сейсмических сил

$$S_{ij} = Agm_i\beta(T_j)K_{\Psi} \quad (6)$$

придется несколько уточнить, задавая коэффициент K_{Ψ} для каждой формы колебаний. При этом в формуле (6):

Ag — пиковое расчетное ускорение принимается в соответствии с приведенными расчетами;

K_{Ψ} назначается по каждой форме в зависимости от модального коэффициента неупругого сопротивления. Величину K_{Ψ} можно вычислить по формуле (7):

$$K_{\Psi j} = \sqrt{\frac{\gamma_{\text{эт}}}{\gamma_j}}, \quad (7)$$

где γ_j — коэффициент неупругого сопротивления по j -й форме колебаний, $\gamma_{\text{эт}} = 0,15$ — эталонное значение γ , характерное для основной формы горизонтальных колебаний зданий на плотных скальных основаниях [12, 13].

Сочетание нагрузок

Вопрос сочетания нагрузок весьма важен для расчета сооружений на воздействия различной силы и повторяемости. В действующих в России нормах сейсмостойкого строительства сейсмическая нагрузка сочетается только с нагрузками от подвижного состава на мостах и длительной снеговой нагрузкой. Даже для гражданского строительства сложившийся подход ошибочен. Для высотных сооружений и башен необходим совместный учет сейсмических и ветро-

вых нагрузок [14, 15]. Что касается портовых и шельфовых сооружений, то они значительную часть времени подвержены ледовым, волновым и ветровым нагрузкам. В связи с этим важным вопросом становится оценка коэффициентов сочетаний указанных нагрузок с сейсмической нагрузкой. Для оценки этих коэффициентов необходимо задать функцию плотности распределения (далее — ф.п.р.) сейсмической и сочетаемой с ней нагрузок. Для описания сейсмической нагрузки удобно использовать δ — корректированный процесс. Ф.п.р. такого процесса является суммой δ — функции и некоторой зависимости, заданной на интервале от 0 до ∞ . δ — функция сдвинута на бесконечно малую величину вправо, чтобы выполнялось условие:

$$\int_0^{\infty} \delta(x+0)dx = 1, \quad (8)$$

Тогда ф.п.р. сейсмической нагрузки, описываемой в терминах PGA, примет вид:

$$p(x) = (1-L) \cdot \delta((x+0)) + L \cdot p_0(x), \quad (9)$$

где L — вероятность возникновения землетрясения, $p_0(x)$ — вероятность того, что величина x будет превышена ускорениями основания в процессе землетрясения.

Если учесть, что на площадке строительства могут происходить землетрясения различной силы L , по формуле (9) примет вид (10):

$$p(x) = \left(1 + \sum_I L_I\right) \cdot \delta(x+0) + \sum_I L_I \cdot p_I(x). \quad (10)$$

Для величины $p_I(x)$ может быть использована ф.п.р. Вейбулла [16]. Это же распределение используется для ветровой нагрузки [14, 17], и логично использовать его для волновой нагрузки. Для ледовой нагрузки ф.п.р. имеет вид (8), причем L — вероятность наличия льда вблизи со-

ружения. Зная ф.п.р. нагрузок, можно перейти к заданию их сочетаний. Для этого возможны два принципиальных подхода [18]. Первый подход рассматривает множество равновероятных пар и выбирает из них наихудшую [19]. Вторым подход — на построении ф.п.р. суммарной величины анализируемого фактора [18]. Последний оказывается более консервативным, но не позволяет непосредственно ввести коэффициенты сочетаний и требует знание ф.п.р. всех суммируемых нагрузок. Ниже авторы подробно рассмотрели применение первого подхода, определяющего коэффициенты сочетаний к нагрузкам в рамках действующих нормативных документов.

Вероятность появления пары равна произведению вероятностей этих событий. Условие определяет множество равновероятных пар (x, y) :

$$P_1(x)P_2(y) = [P]. \tag{11}$$

На плоскости x, y определяет некоторую кривую. С другой стороны усилие или другой фактор в элементах сооружения определяется как функция $(\Phi)x, y$ (рис. 7). В большинстве случаев:

$$\Phi(x, y) = Ax + By. \tag{12}$$

В точке касания кривых $\Phi(x, y)$ и $P(x, y)$ получаем искомую точку (x, y) , определяющую значения x и y , при которых фактор является наибольшим на множестве равновероятных пар.

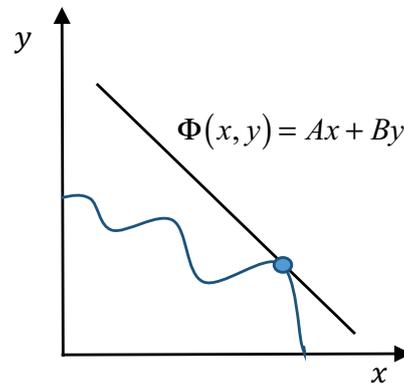


Рис. 7. Кривые, определяемые зависимостями $P(x, y)$ и $\Phi(x, y)$

Такая точка получается в случае, когда кривая

$y(x)$ выпуклая, и $\frac{dy}{dx} > \frac{A}{B}$ (рис. 8, а). Если кривая $y(x)$ вогнута или выполняется одно из усло-

вий $\frac{dy}{dx} < \frac{A}{B}$ для всех x , при которых $y > 0$ или

$\frac{dy}{dx} > \frac{A}{B}$ для всех x , при которых $y > 0$, то точки

оптимума не существует (рис. 8, б, в, г). В первом случае существует точка минимума. В остальных

двух случаях максимум нагрузки реализуется на одном из концов кривой $y(x)$.

Рассмотрим в качестве примера сочетание сейсмической и ледовой нагрузки. Для ледовой нагрузки используем данные, приведенные в [20]

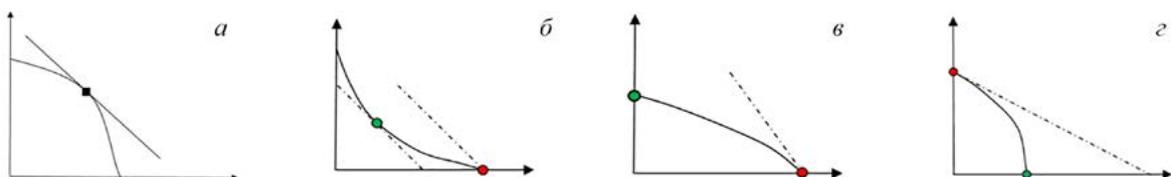


Рис. 8. Вид зависимости $y(x)$:

а — при котором существует опасная пара (x, y) ;

б, в, г — случаи, когда сочетания нагрузок не требуются

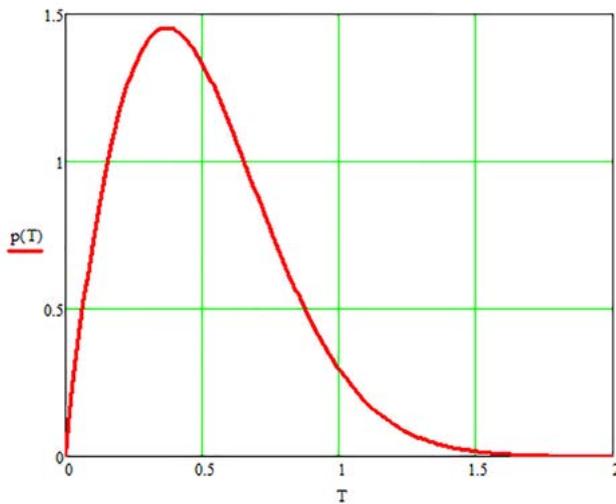


Рис. 9. Вид ф.п.р. для ледовой нагрузки

для одного из районов Камчатки. Распределение толщины льда принято в [20] по закону Вейбулла с параметром масштаба $\beta = 0,563$ и параметром формы $\nu = 1,85$. В расчете принято, что лед находится вблизи сооружений постоянно, т. е. $L = 1$. Вид ф.п.р. представлен на рис. 9. В табл. 3 представлены вычисления функции $y(x)$ для района с ситуационной сейсмичностью 7-8-9 и предельного состояния DLS с повторяемостью раз в 50 лет и вероятностью превышения примерно 0,02.

Приведенные рисунки показывают, что для сильных воздействий ситуационная сейсмичность не влияет на величину коэффициента сочетаний. Для слабых же воздействий это влияние следует учитывать.

ТАБЛИЦА 3. Построение зависимости $y(x)$

Коэффициент сочетаний для сейсмической нагрузки	Расчетное ускорение, y , m/s^2	Вероятность превышения для сейсмической нагрузки	Вероятность превышения для ледовой нагрузки	Расчетная толщина льда, x , м	Коэффициент сочетаний для ледовой нагрузки
0,214	0,04	0,417	0,048	0,999	0,999
0,265	0,0495	0,196	0,102	0,958	0,958
0,294	0,055	0,148	0,135	0,931	0,931
0,325	0,06	0,119	0,168	0,899	0,899
0,358	0,067	0,097	0,207	0,855	0,855
0,374	0,07	0,089	0,224	0,834	0,834
0,412	0,077	0,074	0,271	0,772	0,772
0,433	0,081	0,068	0,292	0,743	0,743
0,46	0,086	0,062	0,325	0,696	0,696
0,487	0,091	0,056	0,359	0,647	0,647
0,497	0,093	0,054	0,371	0,630	0,630
0,519	0,097	0,051	0,396	0,594	0,594
0,551	0,103	0,046	0,435	0,538	0,538
0,626	0,117	0,038	0,530	0,409	0,409
0,786	0,147	0,027	0,732	0,300	0,300
0,818	0,153	0,026	0,773	0,270	0,270
0,866	0,162	0,024	0,839	0,220	0,220
0,893	0,167	0,023	0,875	0,190	0,190
0,920	0,172	0,022	0,907	0,160	0,160
0,957	0,179	0,021	0,960	0,100	0,100
0,989	0,185	0,020	1	0,001	0,001

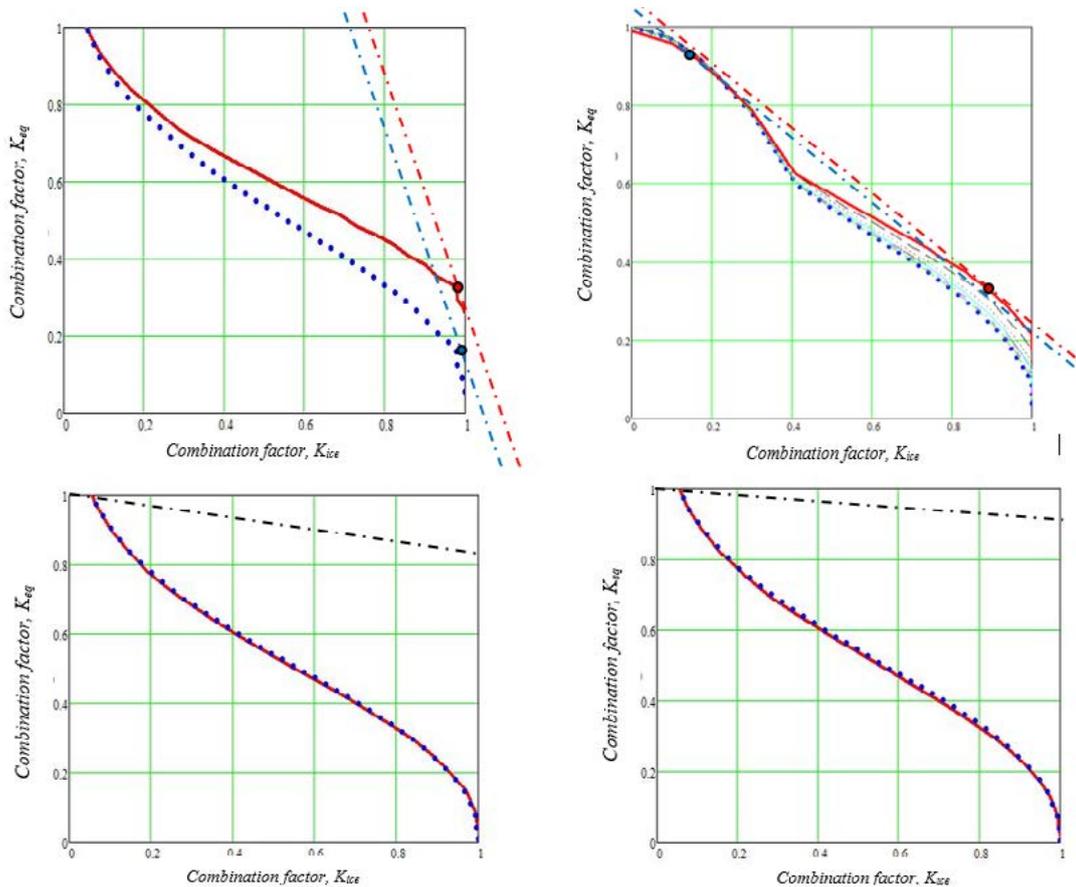


Рис. 10. Зависимость коэффициентов сочетания ледовой нагрузки от сейсмической с ситуационной сейсмичностью 7-8-9 и 10-10-10 (по вертикальной оси — коэффициенты сочетания сейсмической нагрузки, по горизонтальной оси — коэффициенты сочетания ледовой нагрузки)

Для поиска экстремальной пары вернемся к выражению (12), представив его следующим образом:

$$\Phi = K_{eq} A_0 \Phi_{eq} + K_{ice} \Delta_0 \Phi_{ice}, \tag{13}$$

при этом:

$$K_{eq} = \frac{\Phi}{A_0 \Phi_{eq}} - K_{ice} \frac{\Delta_0 \Phi_{ice}}{A_0 \Phi_{eq}} = C - K_{ice} \frac{\Delta_0 \Phi_{ice}}{A_0 \Phi_{eq}}, \tag{14}$$

Меняя параметр С, получаем семейство прямых, из которых необходимо выбрать касательную к построенным зависимостям $K_{eq}(K_{ice})$.

Для слабых зависимостей оптимальная пара существует, причем для разной ситуационной сейсмичности оптимальные пары различны. Для SLS при ситуационной сейсмичности $I_A = 10, I_B = 10, I_C = 10$ получается $K_{eq} = 0,34$, а $K_{ice} = 0,96$. При ситуационной сейсмичности $I_A = 7, I_B = 8, I_C = 9$ получается $K_{eq} = 0,17$, а $K_{ice} = 0,98$. Для DLS при ситуационной сейсмичности $I_A = 10, I_B = 10, I_C = 10$ получается $K_{eq} = 0,34$, а $K_{ice} = 0,9$. При ситуационной сейсмичности $I_A = 7, I_B = 8, I_C = 9$ получается $K_{eq} = 0,93$, а $K_{ice} = 0,18$. Расчеты облегчаются тем, что в рассмотренном случае разница в суммарных усилиях относительно невелика и можно назначать сочетания по самой неблагоприятной ситуационной сейсмичности.

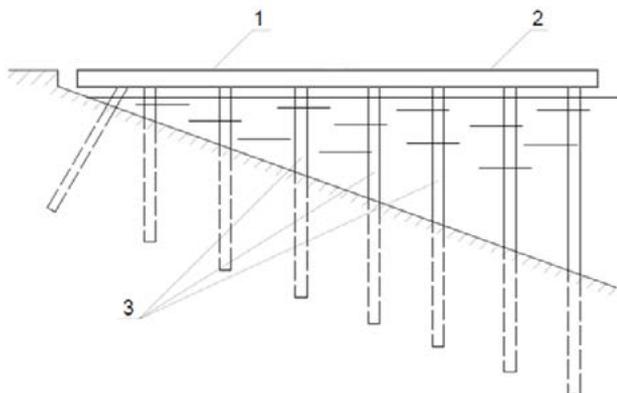


Рис. 11. Схематичный чертеж причала эстакадного типа:
1 — береговая часть, 2 — ФПС,
3 — морская часть

В качестве примера рассмотрим причал эстакадного типа (ПЭТ), представляющего собой массивную железобетонную плиту, опирающуюся на головы легких свай (рис. 11).

В первом приближении такую конструкцию можно моделировать системой с одной степенью свободы. Жесткость системы равна суммарной жесткости свай. При малых колебаниях коэффициент неупругого сопротивления принимается равным 0,07, что соответствует армированию свай 3,5 % по графику на рис. 4. В качестве воздействия рассмотрены две 9-балльные акселерограммы: синтетическая, сгенерированная по методике [21], и запись реального воздействия

с преобладающей частотой, совпадающей с собственной частотой сооружения.

Входные параметры жесткости и демпфирования в сваях различались при анализе SLS и DLS. При определении жесткости системы из разреза исключается растянутая зона бетона, а коэффициент неупругого сопротивления $\gamma = 0,63$.

В результате расчета получены усилия в сваях, смещение плиты платформы, спектр ускорений и скоростей на платформе. Расчет свай проводился по трещиностойкости. На рис. 12 приведены графики несущей способности и трещиностойкости свай. Точкой нанесены данные результата расчета.

Численные значения усилий свай приведены в табл. 4.

Заключение

Выполненная работа показывает основные особенности расчета сооружений на действие слабых землетрясений. К их числу относятся:

Предельные состояния DLS и SLS для рассматриваемых сооружений — это нарушение трещиностойкости (DLS) и прочности (SLS).

Для исключения паники среди жителей и посетителей культовых и зрелищных сооружений необходимо построение поэтажных скоростей. Пиковые значения скоростей в определенных октавных диапазонах должны быть ограничены.

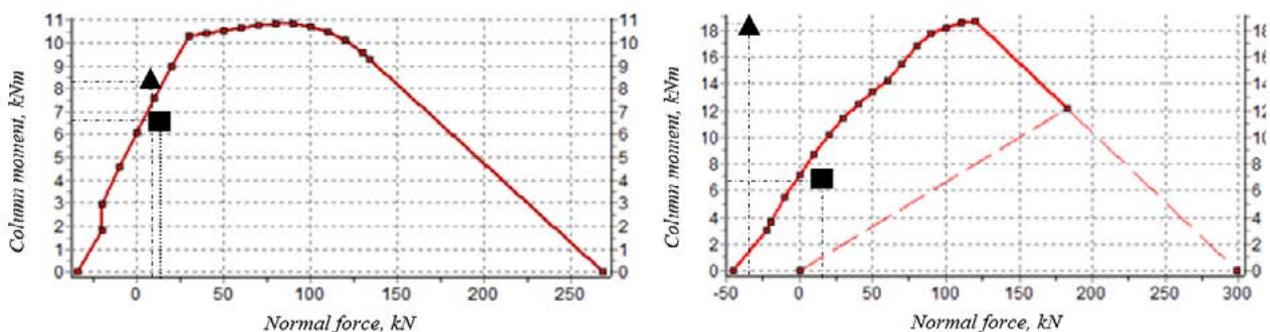


Рис. 12. Результаты расчета прочности (справа) и трещиностойкости (слева) строительных свай:

- — для ситуационной сейсмичности $I_A = 7, I_B = 8, I_C = 9$;
- ▲ — для сейсмичности $I_A = 10, I_B = 10, I_C = 10$

ТАБЛИЦА 4. Некоторые результаты расчетов причала эстакадного типа

Ситуационная сейсмичность	Лед		Землетрясение			
	Комбинированный коэффициент, K_{ice}	Нагрузка на лед, S_{ice} , кН	Комбинированный коэффициент, K_{eq}	Сейсмическая нагрузка, S_{eq} , кН	Максимальный момент столба, M , кНм	Нормальная сила, N , кН
Предельное состояние работоспособности						
7-8-9	0,96	76,02	0,333	25,60	68,675	17,25
10-10-10	0,985	76,02	0,160	151,4	83,583	13,6
Состояние предела повреждения						
7-8-9	0,895	76,24	0,333	37	67,848	10,75
10-10-10	0,160	76,24	0,92	228,8	187,823	-37

Рассматриваемое условие весьма важно не только для зрелищных и культовых сооружений, в которых паника может вызвать давку и гибель людей. Для портовых и особенно шельфовых сооружений люди могут попрыгать в панике в воду и утонуть. Так можно объяснить наличие в открытом океане кораблей, оставленных командой. Для зданий известны случаи, когда люди в панике, реализуя инстинкт самосохранения, выпрыгивали из окон высотных зданий. Необходим также расчет крепления фрагментов оборудования, падение которых может травмировать людей.

Линейная упругость работы сооружения позволяет придать расчету наглядность и физический смысл. Для этого необходимо более полное представление расчетной схемы, в частности учет демпфирования, взаимодействие сооружения с грунтом и пространственная работа сооружения в процессе колебаний.

Для расчета на слабые воздействия можно использовать ЛСМ. При расчете следует задавать $K_1 = 1$, а пиковые ускорения определять расчетом исходя из принятой повторяемости DLS и SLS.

При расчете SLS следует снижать модуль упругости бетона и повышать демпфирование в элементах по сравнению с расчетом DLS.

В расчетах по акселерограммам следует подбирать резонансные для сооружения (или его элементов) акселерограммы. В расчетах DLS

преобладающая частота акселерограммы будет несколько меньше, чем при расчете SLS.

Важнейшим отличием расчета DLS и SLS от нормативного является необходимость сочетания сейсмических нагрузок с другими возможными нагрузками. В первом приближении можно просто рассматривать сейсмические нагрузки для DLS и SLS как дополнительные и сочетать их с другими нагрузками согласно действующим СП.

Более аккуратный подход предусматривает построение равновероятных пар нагрузок и выбор из них наиболее опасной пары. Если в расчетах на сильные воздействия сочетания нагрузок практически не рассматривались, то при анализе DLS и SLS эти сочетания приобретают большое значение.

Расчет по ЛСМ позволяет оценить прочность и трещиностойкость элементов сооружения. Для расчетов крепежа оборудования и оценки поведения людей при землетрясении необходим расчет по расчетным акселерограммам с построением поэтажных акселерограмм и велосиграм.

Благодарность

Статья подготовлена при поддержке гранта РФФИ (Российский фонд фундаментальных исследований): ГФЕН_а 21-58-53012 «Теоретические основы и методы проектирования сценариев накопления ущерба при сейсмических воздействиях на примере портов и гидротехнических сооружений».

Библиографический список

1. Dolcea M. Vulnerability assessment and earthquake damage scenarios of the building stock of Potenza (Southern Italy) using Italian and Greek methodologies / M. Dolcea, A. Kappos, A. Masia et al. // *Engineering Structures, Engineering Structures* 28. — 2006. — Pp. 357–371.
2. Le norme tecniche per le costruzioni. Il ministero delle infrastrutture e dei trasporti. — 2018.
3. ГОСТ 12.1.003—83. Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Шум. Общие требования безопасности (с Изменением № 1).
4. Nesterova O. P. Taking account of damping in estimating structure earthquake stability / O. P. Nesterova, N. V. Nikonova, M. Yu. Fedorova // *Materials Physics and Mechanics* 26. — 2016. — Pp. 57–60.
5. Руководство по проектированию фундаментов машин с динамическими нагрузками. М.: Стройиздат, 1982. — С. 207.
6. Ильичев В. А. Свайные фундаменты в сейсмических районах / В. А. Ильичев, Ю. В. Монголов, В. М. Шаевич и др. — М.: Стройиздат, 144 с.
7. Аптикаев Ф. Ф. Инструментальная шкала сейсмической интенсивности / Ф. Ф. Аптикаев. — М.: ООО «Наука и образование», 2012. — 176 с.
8. Арещенко Т. С. Задание уровня сейсмического воздействия для оценки сейсмостойкости сооружений при многоуровневом проектировании / Т. С. Арещенко, С. В. Прокопович, О. Б. Сабирова, Е. Д. Фролова // *Природные и техногенные риски. Безопасность сооружений*. — 2018. — № 4. — С. 25–27.
9. Арещенко Т. С. Программа определения пиковых ускорений сейсмического воздействия. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2018664350 / Т. С. Арещенко, С. В. Прокопович, О. Б. Сабирова и др. Зарегистрирована 14 ноября 2018 г.
10. Сейсмическая соотрясаемость территории СССР // Под ред. Ю. В. Ризниченко. — 1979. — М.: Наука, 192 с.
11. Nazarova Sh. Sh. Setting peak ground accelerations for performance-based design of earthquake-resistant constructions / Sh. Sh. Nazarova, A. M. Uzdin // *Seismic instruments*. — 2020. — Vol. 56. — № 2. — Pp. 225–236.
12. Уздин А. М. Влияние демпфирования на величину коэффициента динамичности / А. М. Уздин, М. Ю. Цибарова // *Экспресс-информация «Сейсмостойкое строительство»*. — 1985. — Вып. 11. — С. 27–30.
13. Уздин А. М. Сейсмостойкость мостов / А. М. Уздин, И. О. Кузнецова. — Саарбрюкен (Германия), Palmarium, 2014. — 450 с.
14. Сахаров О. А. Анализ сейсмостойкости металлической башни «Ramboll» системы сотовой телефонной связи / О. А. Сахаров // *Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений*. — 2005. — № 2. — С. 10–14.
15. Yin Y. J. Snow and earthquake load combination considering snow accumulation / Y. J. Yin, Y. Li, W. M. Bulleit // *The 14 th World Conference on Earthquake Engineering, October 12–17, 2008*. — Beijing, China.
16. Сабирова О. Б. Распределение пиковых ускорений землетрясения для площадки строительства / О. Б. Сабирова // *Вопросы инженерной сейсмологии*. — 2021. — 48. — № 1. — С. 5–14. — DOI: <https://doi.org/10.21455/VIS2021.1-1>.
17. Райзер В. Д. Методы теории надежности в задачах нормирования расчетных параметров строительных конструкций / В. Д. Райзер. — М., Стройиздат, 1986. — 193 с.
18. Poutanen T. Load combination of permanent and variable loads. *Rakenteiden Mekaniikka* / T. Poutanen, J. Mäkinen, S. Pursiainen et al. // *Journal of Structural Mechanics*. — 2018. — Vol. 51. — № 1. — Pp. 1–9.
19. Sakharov O. A. On the issue of assigning coefficients for combinations of seismic and other loads / O. A. Sakharov // *Earthquake-resistant construction*. — 2003. — № 2. — Pp. 9–11.
20. Сабирова О. Б. Оценка коэффициентов сочетаний сейсмической и ледовой нагрузок / О. Б. Сабирова // *Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений*. 2019. — № 1. — С. 28–32.
21. Долгая А. А. Моделирование сейсмического воздействия коротким временным процессом / А. А. Долгая // Э-И. ВНИИТПИ. Сер.: Сейсмостойкое строительство. — 1994. — Вып. 5-6. — С. 56–63.

Дата поступления: 05.05.2022

Решение о публикации: 28.05.2022

Контактная информация:

УЗДИН Александр Моисеевич — д-р техн. наук, профессор; uzdin@mail.ru

БЕНИН Андрей Владимирович — канд. техн. наук, доцент; benin.andrey@mail.ru

НАЗАРОВА Шохиста Шукурилла кизи — аспирант; shoxistashukurullayevna@yandex.ru

САБИРОВА Ойпошша Бахтияровна — магистр; sabirovaanna95@yandex.ru

БЕЛАШОВ Михаил Сергеевич — аспирант; derof1996@mail.ru

Features of Construction Calculation on Frequent Weak Earthquake Impact

A. M. Uzdin, A. V. Benin, Sh. Sh. Nazarova, O. B. Sabirova, M. S. Belashov

Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation

For citation: Uzdin A. M., Benin A. V., Nazarova Sh. Sh., Sabirova O. B., Belashov M. S. Features of Construction Calculation on Frequent Weak Earthquake Impact // *Proceedings of Petersburg State Transport University*, 2022, vol. 19, iss. 2, pp. 390–404. (In Russian). DOI: 10.20295/1815-588X-2022-2-390-404

Summary

Purpose: To show the features of the calculation of constructions in opposition to the effect of weak frequent earthquakes. **Methods:** Numerical modeling of seismic vibrations of constructions. Analysis of limit states. **Results:** The specificities of construction calculation for impact of weak earthquakes are analyzed. Earthquakes of 1 per 30 and per 50 years repeatability are considered. In the first case, after an earthquake a construction should operate standardly, without damage. In the second case, damages, that does not affect construction exploitation, are accepted. Main attention is paid on the three issues: setting of elastic and damping characteristics of ferroconcrete, formalization of limit states, load combinations. The dependence of a damping from ferroconcrete reinforcement degree is estimated. When evaluating limit states, besides calculations on crack resistance and strength, the possibility to exclude people panic is considered. To make so, it's proposed to limit speed level in certain octave ranges. Proposals are developed for estimation of coefficients for combinations of various loads with seismic ones. The coefficients for combinations of seismic and ice loads are evaluated. **Practical importance:** A system of calculating coefficients has been established to assess seismic resistance under relatively weak, frequent impacts. It's been shown that for strong impacts, the combination coefficients for different regions turn out to be close to each other, while for weak impacts, they can differ drastically.

Keywords: Weak earthquakes, frequent earthquakes, limit state, reinforcement coefficient, crack resistance, strength, load combination coefficient.

References

1. Dolcea Mauro, Kappos Andreas, Masia Angelo, Penelisb Gregory, Vona Marco. Vulnerability assessment and earthquake damage scenarios of the building stock of Potenza (Southern Italy) using Italian and Greek methodologies. *Engineering Structures*, 2006, I. 28, pp. 357–371.

2. Le norme tecniche per le costruzioni. Il ministero delle infrastrutture e dei trasporti. 2018.

3. *GOST 12.1.003-83 Sistema standartov bezopasnosti truda (SSBT). Shum. Obshchie trebovaniya bezopasnosti (s Izmeneniyem N 1)* [GOST 12.1.003-83 Occupational safety standards system (SSBT). Noise. General safety requirements (with Amendment No. 1)]. (In Russian)

4. Nesterova O. P., Nikonova N. V., Fedorova M. Yu., Uzdin A. M., Vorobyova K. V. Taking account of damping

in estimating structure earthquake stability. *Materials Physics and Mechanics*. 2016, I. 26, pp. 57-60.

5. *Rukovodstvo po proektirovaniyu fundamentov mashin s dinamicheskimi nagruzkami* [Guidelines for the design of foundations for machines with dynamic loads]. Stroyizdat Publ., Moscow, 1982, p. 207. (In Russian)

6. Il'ichev V. A., Mongolov Yu. V., Shaevich V. M. *Svaynye fundamenty v seismicheskikh rayonakh* [Pile foundations in seismic regions]. Stroyizdat Publ., Moscow, 144 p. (In Russian)

7. Aptikaev F. F. *Instrumental'naya shkala seismicheskoy intensivnosti* [Instrumental scale of seismic intensity]. Moscow: «Nauka i obrazovanie» Publ., 2012. 176 p. (In Russian)

8. Areshchenko T. S., Prokopovich S. V., Sabirova O. B., Frolova E. D. «Zadanie urovnya seismicheskogo vozdeystviya dlya otsenki seymstoykosti sooruzheniy pri

mnogourovnevom proektirovaniy» [“Setting the level of seismic impact to assess the seismic resistance of structures in multi-level design”]. *Prirodnye i tekhnogennye riski. Bezopasnost' sooruzheniy* [Natural and technogenic risks. Building safety]. 2018, I. 4, pp. 25-27. (In Russian)

9. Areshchenko T. S., Prokopovich S. V., Sabirova O. B., Frolova E. D., Uzdin A. M. *Programma opredeleniya pikovykh uskoreniy seysmicheskogo vozdeystviya. Svidetel'stvo o gosudarstvennoy registratsii programmy dlya EVM №2018664350. Avtory: Uzdin A. M., Prokopovich S. V., Areshchenko T. S., Frolova E. D., Sabirova O. B. Zaregistrovanna 14 noyabrya 2018 g.* [Program for determination of peak accelerations of seismic impact. Certificate of state registration of the computer program No. 2018664350. Authors: Uzdin A. M., Prokopovich S. V., Areshchenko T. S., Frolova E. D., Sabirova O. B. Registered November 14, 2018]. (In Russian)

10. *Seysmicheskaya sotryasaemost' territorii SSSR* [Seismic shaking of the territory of the USSR]. Moscow, Nauka Publ., 1979. 192 p. (In Russian)

11. Nazarova Sh. Sh., Uzdin A. M. Setting peak ground accelerations for performance-based design of earthquake-resistant constructions. *Seismic instruments*. 2020, vol. 56, I. 2, pp. 225-236.

12. Uzdin A. M., Tsibarova M. Yu. Vliyanie dempfirovaniya na velichinu koeffitsienta dinamichnosti [Influence of damping on the value of the coefficient of dynamism]. *Ekspress-informatsiya “Seysmostoykoe stroitel'stvo”* [Express-information “Seismic-resistant construction”]. 1985, I. 11, pp. 27-30. (In Russian)

13. Uzdin A. M., Kuznetsova I. O. *Seysmostoykost' mostov* [Seismic resistance of bridges]. Saarbrücken (Germaniya), Palmarium Publ., 2014. 450 p. (In Russian)

14. Sakharov O. A. Analiz seysmostoykosti metallicheskoy bashni «Ramboll» sistemy sotovoy telefonnoy svyazi [Analysis of the seismic resistance of the metal tower “Ramboll” of the cellular telephone system]. *Seysmostoykoe stroitel'stvo. Bezopasnost' sooruzheniy* [Seismic construction. Building safety]. 2005, I. 2, pp. 10-14. (In Russian)

15. Yin Y. J., Li Y., Bulleit W. M. Snow and Earthquake Load Combination Considering Snow Accumulation. The 14th World Conference on Earthquake Engineering. October 12-17, 2008, Beijing, China.

16. Sabirova O. B. Raspredelenie pikovykh uskoreniy zemletryaseniya dlya ploshchadki stroitel'stva [Distribution of peak earthquake accelerations for the construction site.].

Voprosy inzhenernoy seysmologii [Issues of engineering seismology.]. 2021, vol. 48, I. 1, pp. 5–14. Available at: <https://doi.org/10.21455/VIS2021.1-1>. (In Russian)

17. Rayzer V. D. *Metody teorii nadezhnosti v zadachakh normirovaniya raschetnykh parametrov stroitel'nykh konstruktsey* [Methods of the theory of reliability in the problems of normalizing the design parameters of building structures]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1986. 193 p. (In Russian)

18. Tuomo Poutanen, Jari Mäkinen, Sampsa Pursiainen, Tim Länsivaara. Load combination of permanent and variable loads. *Rakenteiden Mekaniikka (Journal of Structural Mechanics)*. 2018, vol. 51, I. 1, pp. 1–9.

19. Sakharov O. A. On the issue of assigning coefficients for combinations of seismic and other loads. *Earthquake-resistant construction*. 2003, I. 2, pp. 9-11.

20. Sabirova O. B. Otsenka koeffitsientov sochetaniy seysmicheskoy i ledovoy nagruzok [Evaluation of the coefficients of combinations of seismic and ice loads]. *Seysmostoykoe stroitel'stvo. Bezopasnost' sooruzheniy* [Seismic construction. Building safety]. 2019, I. 1, pp. 28-32. (In Russian)

21. Dolgaya A. A. Modelirovanie seysmicheskogo vozdeystviya korotkim vremennym protsessom [Modeling of seismic action by a short time process]. *E-I. VNIINTPI. Ser. “Seysmostoykoe stroitel'stvo”* [E-I. VNIINTPI. Ser. “Seismic resistant construction”]. 1994, I. 5-6, pp. 56-63. (In Russian)

Received: May 05, 2022

Accepted: May 28, 2022

Author's information:

Alexander M. UZDIN — D. Sci. in Engineering, Professor; uzdin@mail.ru

Andrey V. BENIN — PhD in Engineering, Associate Professor; benin.andrey@mail.ru

Shoxista Sh. NAZAROVA — Postgraduate Student; shoxistashukurullayevna@yandex.ru

Oyposhsa B. SABIROVA — Master's Degree Student; sabirovaanna95@yandex.ru

Mikhail S. BELASHOV — Postgraduate Student; derof1996@mail.ru