

УДК 624.042.7

© Д. М. Жемчугов-Гитман, аспирант  
(Петербургский государственный университет  
путей сообщения Императора Александра I,  
Санкт-Петербург, Россия)  
E-mail: trust25t@yandex.ru

DOI 10.23968/1999-5571-2024-21-2-51-61

© D. M. Zhemchugov-Gitman, post-graduate student  
(Emperor Alexander I St. Petersburg  
State Transport University,  
St. Petersburg, Russia)  
E-mail: trust25t@yandex.ru

## ВВЕДЕНИЕ ПОПРАВКИ НА ДЕМПФИРОВАНИЕ В РАСЧЕТАХ ПО ЛИНЕЙНО-СПЕКТРАЛЬНОЙ ТЕОРИИ СЕЙСМОСТОЙКОСТИ

### INTRODUCTION OF DAMPING CORRECTION FACTOR IN RESPONSE-SPECTRAL METHOD OF SEISMIC RESISTANCE ANALYSIS

Рассматриваются вопросы учета демпфирования в линейно-спектральной теории сейсмостойкости. Определены недостатки актуальных руководящих документов, приводится сопоставление имеющихся зарубежных подходов по учету демпфирования, отличного от базового. Предлагается подход, исключающий необходимость введения дополнительного коэффициента, корректирующего динамический коэффициент относительно базового, а коррекция динамического коэффициента определяется затуханием в системе и жесткостью сооружения. Коэффициент динамичности определен по результатам обработки около 200 записей сильных землетрясений. Предлагается при определении коэффициента динамичности учитывать конечность воздействия введением поправочного коэффициента.

*Ключевые слова:* сейсмическое воздействие, линейно-спектральная теория сейсмостойкости, демпфирование.

The issues of damping accounting in the linear-spectral theory of seismic resistance are considered in the article. Some shortcomings of the currently valid building codes related to the issue discussed in the study are outlined, and a comparison of available foreign approaches to accounting for damping other than the baseline one is provided. An approach is proposed that eliminates the need to introduce an additional factor to correct the dynamic coefficient relative to the base coefficient, and the correction of the dynamic coefficient is determined by the attenuation in the system and the stiffness of the structure. The dynamic coefficient was determined from the results of processing about 200 records of violent earthquakes. It is proposed to take into account the finiteness of the impact by introducing a correction factor when determining the dynamic coefficient.

*Keywords:* seismic impact, linear-spectral theory of seismic resistance, damping.

#### Введение

Расчет по линейно-спектральной теории сейсмостойкости (ЛСТ) обязателен при проектировании сооружений в сейсмически опасных районах РФ<sup>1</sup>. В рамках ЛСТ затухание может существенно влиять на сейсмические нагрузки. Известно, что затухание сильнее всего влияет в случае резонанса, а также при уровне затухания в долях от критического ( $\xi$ ) от 0 до 0,3, а при стремле-

нии к критическому интенсивность влияния затухания снижается.

В данной работе исследование затухания построено на модели ЛСТ, предложенной А. М. Уздиным [1, 2]. В ней предполагается, что при анализе сейсмических нагрузок на сооружение рассматривается резонанс. Поскольку при резонансе недемпфированной системы динамический коэффициент стремится к бесконечности, для оценки нагрузок на систему по принятой модели ЛСТ обязательно необходимо учитывать затухание.

<sup>1</sup> СП 14.13330.2018. Строительство в сейсмических районах. Актуализированная редакция СНиП II-7-81\*; введ. с 25.11.2018. М.: Минстрой России, 2018. 116 с.



**Состояние вопроса****Отечественные нормативные документы**

Логика актуальных нормативных документов в РФ<sup>2</sup> разделяет здания на две категории:

1. Условно жесткие сооружения, колебания которых характеризуются преобладающими сдвиговыми деформациями по грунту.

2. Условно гибкие сооружения, характеризующиеся значительным влиянием изгибных деформаций самого сооружения, в том числе высокие здания или каркасные.

За опорное воздействие для построения нормативной методики принято воздействие на условно жесткое сооружение, а для учета сооружений, в которых изгибные колебания преобладают над сдвиговыми (по грунту), введен коэффициент, который в современной трактовке норм получил обозначение  $K_\psi$  и характеризует отклонение затухания от опорной величины.

Основная проблема современной нормативной трактовки в том, что ее посылки не сформулированы в четком виде и диапазон масштабных коэффициентов достаточно узок. Методикой не предполагается количественная оценка характеристик затухания в системе «сооружение – фундамент – грунтовый массив», для которой демпфирование будет не однородным, а различным для каждой формы колебаний и характеризоваться материалом и уровнем разрушения.

В то же время в нормативных документах на проектирование транспортных сооружений<sup>3</sup> эти проблемы частично решены. В документе регламентирована возможность распределения  $K_\psi$  пропорционально энергии деформации при разложении нагрузки по формам колебаний. В зависимости от величины коэффициента затухания для каждой формы колебаний корректируется кривая

динамичности, соответствующая базовой величине 5 % от критического по формуле

$$K_\psi = \frac{1,5}{40\xi + 1} + 0,5, \quad (1)$$

где  $\xi$  — параметр затухания в долях от критического.

Этот подход полагается перспективным и позволяет решать широкий класс задач при оценке демпфирования.

**Научные исследования и литература**

В отечественной литературе оценкой влияния затухания занимались И. Л. Корчинский [3], О. А. Савинов [4], Е. С. Сорокин [5], В. А. Семенов [6], А. И. Цейтлин [7], А. М. Резников [8], А. Г. Тяпин [9], А. М. Уздин [10] и др.

Практически важной является модель Мартышкина — Сорокина, по которой затухание полагается пропорциональным величине жесткости.

В иностранной литературе влияние затухания учитывается коэффициентом коррекции спектра ответа при демпфировании, отличным от базового, — *damping reduction (modification, scaling) ratio (DRF)*.

Исследованиями влияния затухания на спектр ответа занимались N. M. Newmark и W. J. Hall [11], W. Voigt, L. Rayleigh [12], W. W. Soroka [13], C. D. Johnson и D. A. Kienholz [14], C. A. Blandon [15], S. V. Tolis и E. Faccioli [16], K. Kawashima и K. Aizawa [17], N. Abrahamson, K. Campbell, S. Rezaeian [18], K. Cicek и B. Erkus [19] и др.

Наиболее практически распространенные модели затухания предложены в форме Фойгта, в том числе Рэлея и Кельвина. Затухание в форме Кельвина — Фойгта принимают пропорциональным скорости деформации, а в форме Рэлея — пропорционально скорости смещения.

В задачах прямой динамики с учетом систем сейсмоизоляции находит применение учет гистерезисного демпфирования. Гистерезисный закон опорной части может быть задан напрямую в программу на основании

<sup>2</sup> Инструкция по определению расчетной сейсмической нагрузки для зданий и сооружений. М., 1962. 128 с.

<sup>3</sup> СП 268.1325800.2016. Транспортные сооружения в сейсмических районах. Правила проектирования; введ. с 17.06.2017. М.: Стандартинформ, 2017. 57 с.

данных от производителя и учтен при расчете во временной области.

В работе [19] структурированы наиболее распространенные коэффициенты коррекции  $DRF$ . Сопоставление коэффициентов коррекции спектров в известных исследованиях показано на рис. 1.

В случае оценки систем с различным демпфированием применяют методы, основанные на определении коэффициента затухания, пропорционального энергии деформаций ( $MSE\ method$ ), описание которого дано в [14].

Многие современные зарубежные исследования, в том числе [18], базируются на анализе зависимостей коэффициентов коррекции спектра от характеристики воздействия: вида спектра ответа акселерограммы, расположения на местности, магнитуды и т. д. На рис. 2 приведен пример подобных результатов.

Таким образом, уточнение характеристик затухания является актуальным и на сегодняшний день.

Автор полагает, что имеющиеся исследования зависимости затухания от положения на местности ведут к чрезмерному усложнению расчетных методик. Предполагается,

что вопрос с затуханием может быть решен теоретически без привязки к местности.

Все имеющиеся исследования базируются на том, что величина  $PGA$  (пиковое ускорение грунта основания при землетрясении) является постоянной. По мнению автора, этот тезис не является верным, что показано в [20, 21], поэтому в данной работе взята за основу модель учета зависимости  $PGA(T_{eq})$  (зависимость  $PGA$  от преобладающего периода на спектре ответа акселерограммы), для которой нет известных исследований по учету затухания по ЛСТ. Именно этот факт определяет новизну данной работы.

### Концепция и структура исследования

Концепция работы построена на предложенном А. М. Уздиным обновлении ЛСТ [1, 2], в котором отклонение затухания для рассматриваемого сооружения от эталонного учтено при формировании коэффициента динамичности  $\beta$ :

$$S = PGA_0 K_{PGA}(T) \beta(\gamma, T) K_1, \quad (2)$$

где  $S$  — сейсмическая нагрузка на единицу массы системы;  $T$  — период собственных колебаний системы;  $\gamma$  — коэффициент неупругого сопротивления;  $K_1$  — коэффициент, учитывающий допустимые повреждения в системе.

Literature	Equation	Notes
Eurocode 8 (2004) and TBEC-18 (2018)	$\sqrt{\frac{10}{5+\xi}}$ *	See Bommer <i>et al.</i> (2000)
FEMA 440 (2005) and ASCE 7-16 (2016)	$\frac{4}{5.6 - \ln(\xi)}$ *	
CALTRANS (CAL-SEIS-10 2010)	$\frac{1.5}{0.4\xi + 1} + 0.5$ *	See Kawashima and Aizawa (1986)
Japanese Code (JP-ISO-01 2001)	$\frac{1.5}{1+10\xi}$ **	
French and Spanish NCSE-02 (2002)	$(\xi/5)^{0.4}$ *	
Old Italian Code (IT-STR-08 2008)	$\sqrt{\frac{7}{2+\xi}}$ *	New Italian Code uses Eurocode 8 (2004)
Chinese Code (GJ50011-10 2010)	$1 + \frac{0.05 - (\xi)}{0.06 + 1.4\xi}$ **	See Zhou <i>et al.</i> (2003)
Newmark and Hall (1969)	$1.309 - 0.194 \ln(\xi)$ **	
Akiyama (1985)	$\frac{1+3h_0+1.2\sqrt{h_0}}{1+3h+1.2\sqrt{h}}$ **	$h_0$ : initial effective damping $h$ : effective damping
Ashour (1987)	$\sqrt{\frac{0.05(1-e^{-0.6\xi})}{\xi(1-e^{-0.05\xi})}}$ **	$18 < \alpha < 65$ , Suggested $\alpha = 18$ for design.
Tolis and Faccioli (1999)	$\sqrt{\frac{15}{10+\xi}}$ *	
Kasai <i>et al.</i> (2003)	$\sqrt{\frac{1+25h_0}{1+25h}}$ **	$h_0$ : initial effective damping $h$ : effective damping
Lin and Chang (2004)	$1 - \frac{aT^{0.3}}{(T+1)^{0.83}}$	$a = 1.303 + 0.436 \ln \xi$ *

\* $\xi$  is in terms of percentage, e.g.  $\xi = 30$  for a damping ratio of 0.30

\*\* $\xi, h, h_0$  are in terms of ratio, e.g.  $\xi = 0.30$  for a damping ratio of 0.30

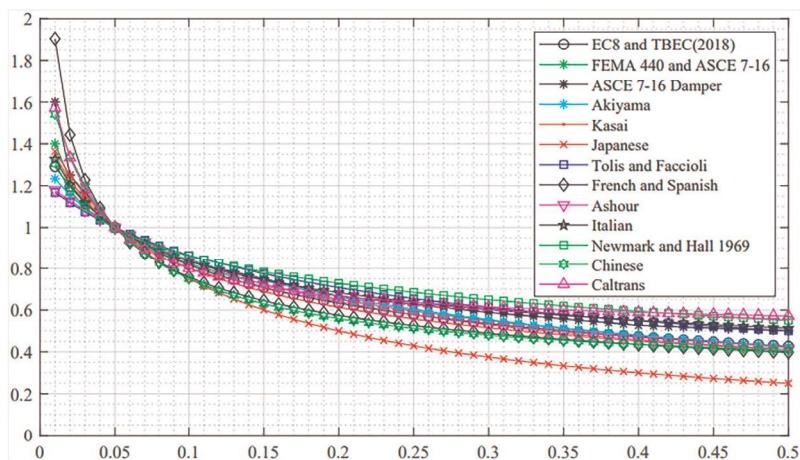


Рис. 1. Сопоставление коэффициентов коррекции затухания относительно базового ( $DRF$ ) в зависимости от коэффициента демпфирования в долях критического  $\xi$  по данным иностранных исследований



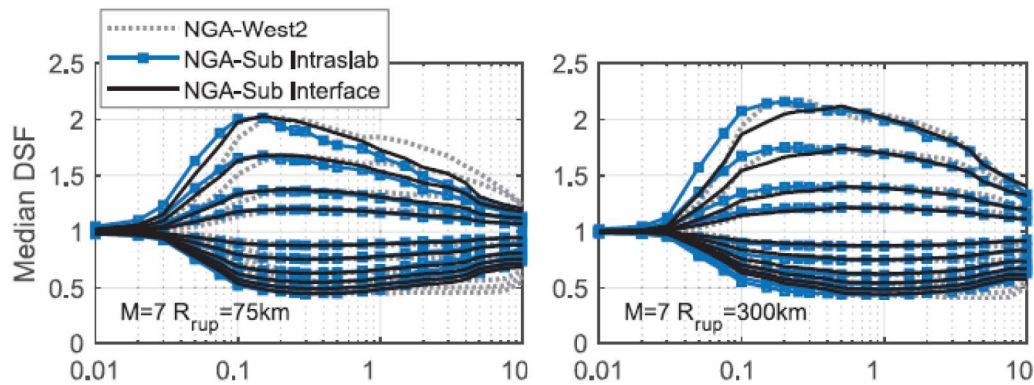


Рис. 2. Зависимость медианного коэффициента коррекции спектра от периода колебаний ( $T$ , с) для различных магнитуд ( $M$ ) и расстояний до разлома ( $R_{rup}$ ). Кривые сверху вниз для демпфирования от критического: 0,5; 1; 2; 3; 7; 10; 15; 20; 25; 30 %

Основа для научных изысканий — обработка около 200 записей сильных сейсмических воздействий.

В предложенной теории учет  $PGA(T_{eq})$  выражен в произведении первых двух множителей —  $PGA_0$  (базовое значение  $PGA$ ) и  $K_{PGA}(T)$  (коэффициент учета переменности  $PGA$  от преобладающего периода воздействия  $T$ ). Коэффициент динамичности  $\beta(\gamma, T)$  в рамках концепции определяется исходя из следующих положений:

1. Величина  $\beta(\gamma)$  характеризует динамический ответ сооружения при сейсмическом воздействии.

2. Сама по себе величина  $\beta(\gamma)$  не зависит от периода собственных колебаний ввиду резонанса воздействия и сооружения. Величина  $\beta(\gamma)$  определяется только коэффициентом затухания.

3. Учитывается конечность сейсмического воздействия. Вводится поправка на скорость раскачивания сооружения, зависящая от периода и демпфирования сооружения, которая приводит к зависимости  $\beta(\gamma, T)$ .

Исследование строилось следующим образом:

1. На основании базы данных акселерограмм построена огибающая спектров ответа ускорений  $\beta(\gamma)$  для значений  $\gamma = 0,05-0,2$ .

2. Найдена аппроксимация максимальных значений  $\beta(\gamma)$ .

3. Введена поправка на скорость раскачивания сооружения  $K(\gamma, T)$ .

Известны аналитические значения коэффициентов динамичности для наиболее характерных случаев воздействия: гармонического  $1/\gamma$  и белого шума  $1/\gamma^{0,5}$  [22, 23]. Логично ожидать аппроксимирующую функцию в виде

$$\beta(\gamma) = \frac{1}{\gamma^\nu}, \quad (3)$$

где  $1 < \nu < 0,5$  — величина, определяемая узкополосностью воздействия.

Итоговый вид искомой зависимости рассматривается в виде

$$\beta(\gamma, T) = K(\gamma, T)\beta(\gamma). \quad (4)$$

### Результаты

#### Зависимость $\beta(\gamma)$

Общий вид огибающей спектров ответа ускорений приведен на рис. 3. Зависимость построена для 9-балльных землетрясений, нормированных на величину  $PGA = 1 \text{ м/с}^2$ . Экстремум на огибающей определен акселерограммой Мехико с преобладающим периодом в 2 с. Полученная кривая отличается от нормативных, для которых пиковые значения  $\beta$  ограничены диапазоном 0,8–1 с. Ожидается, что при увеличении количества записей акселерограмм форма огибающей спектров ответа ускорений будет стремиться к прямой (горизонтальной) линии с постоянным значением ускорений.

Таблица 1

**Подобранные коэффициенты аппроксимаций и достоверность аппроксимации  $R^2$**

Коэффициенты	$a$	$\nu$	$R^2$
Формула (5)	1,000	0,747	0,996
Формула (6)	1,322	0,644	0,999

Аппроксимация функций максимумов выполнена по формулам

$$\beta(\gamma) = \frac{1}{\gamma^\nu}; \quad (5)$$

$$\beta(\gamma) = \frac{a}{\gamma^\nu}, \quad (6)$$

где  $a$  и  $\nu$  — параметры, подбираемые с целью оптимизации критерия аппроксимации.

Критерий оценки аппроксимации — величина достоверности аппроксимации  $R^2$ , в оптимальном случае стремящаяся к 1. Результаты подбора коэффициентов приведены в табл. 1, а сопоставление максимумов огибающей спектров ответа ускорений с аппроксимирующими функциями показано в табл. 2 и на рис. 4. Видно, что результаты по формуле (1) дают высокую сходимость и, что не менее важно, соответствуют теоретическим предпосылкам. Кроме этого, добавлена вторая формула аппроксимации с величиной достоверности аппроксимации, практически равной 1, и с хорошим совпа-

Таблица 2

**Сопоставление аппроксимаций с результатами**

Коэффициент неупругого сопротивления	0,05	0,1	0,15	0,2
Максимумы огибающей спектров ответа ускорений, $m/c^2$	9,080	5,871	4,494	3,713
Формула (5)	9,383	5,590	4,128	3,330
Формула (6)	9,100	5,823	4,485	3,727

дением не комбинации в целом, а отдельных значений  $\beta(\gamma)$ .

**Коэффициент учета длительности воздействия  $K(\gamma, T)$**

Сейсмическое воздействие имеет конечную продолжительность. По этой причине целесообразно учесть влияние скорости раскачивания колебаний.

Для формулирования коэффициента учета конечности воздействия рассмотрим динамическую реакцию одномассовой системы  $R$  во времени при гармонической нагрузке [24, с. 57], которая определяется по следующей зависимости:

$$R(\omega, t, \gamma) = \frac{1}{\gamma} \left( e^{-\frac{\gamma}{2}\omega t} - 1 \right) \cos(\omega t), \quad (7)$$

где  $\omega$  — круговая частота колебаний;  $t$  — время резонансного воздействия.

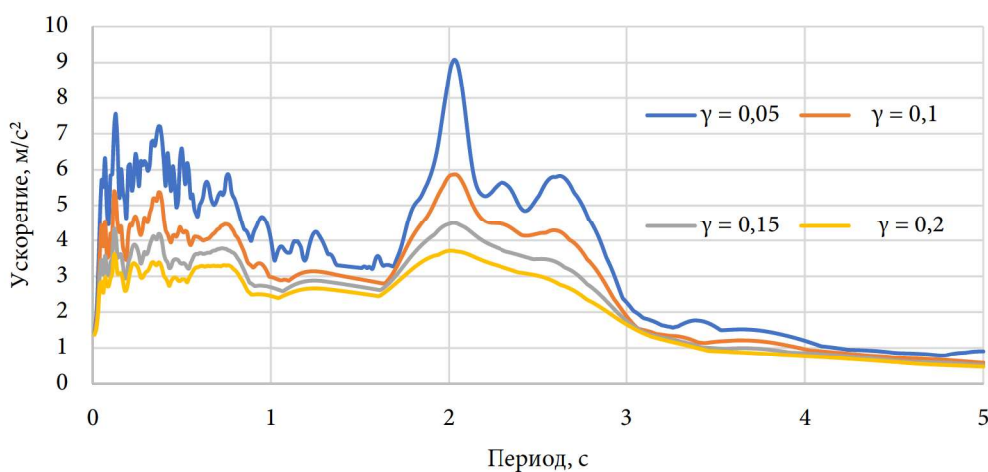


Рис. 3. Огибающая спектров ответа ускорений по базе акселерограмм в зависимости от периода колебаний при коэффициентах неупругого сопротивления 0,05; 0,1; 0,15 и 0,2



Учитывая, что первый множитель определяет коэффициент динамичности, за скорость нарастания амплитуды резонансных колебаний отвечает второй множитель. Упрощая и приводя к периоду колебаний, поправка на длительность воздействия приобретает вид

$$K(T, t, \gamma) = 1 - e^{-\frac{\gamma t}{T}}. \quad (8)$$

Вопрос определения длительности воздействия не является однозначным и требует дополнительных изысканий. На основании работы [25] опорная величина продолжительности резонансного воздействия принята 10 с.

Формула (8) является двухпараметрической и устанавливает зависимости от периода колебаний системы и параметра затухания. Ввиду конечности воздействия, а также специфики резонанса для устройств с различным демпфированием, устанавливаются следующие зависимости:

1. Коэффициент может снижать интенсивность воздействия и быть меньше 1.

2. С ростом периода колебаний сооружения уменьшается количество циклов резонансного воздействия, то есть сооружение может не успеть раскачаться до расчетного коэффициента динамичности. Описанный эффект показан на рис. 5, а.

3. Демпфированные системы по-разному ведут себя в зависимости от степени затухания. Чем меньше затухание, тем больше нужно циклов для достижения экстремального коэффициента динамичности. Описанный эффект показан на рис. 5, б.

4. Максимальный эффект реализуется для гибких слабодемпфированных сооружений, которым нужно больше циклов для выхода на коэффициент динамичности и которые могут не успеть раскачаться.

### Итоговые результаты

Таким образом, итоговая зависимость принимает следующий вид:

$$\beta(\gamma, T) = K(\gamma, T)\beta(\gamma) = \left(1 - e^{-\frac{\gamma \pi \cdot 10}{T}}\right) \frac{1}{\gamma^{0,75}}. \quad (9)$$

Сопоставление значений  $\beta(\gamma, T)$  для разных  $T$  приведено на рис. 6. Видно, что поправка оказывает существенное влияние на податливые здания, а также на  $\gamma$  в диапазоне 0,05–0,3, соответствующих большинству строительных конструкций.

### Обсуждение

#### Качественное сопоставление результатов с актуальной нормативной методикой

В нормативной методике СП 14 базовое воздействие принято на условно жесткое здание, а для сооружений со значительными изгибными деформациями в случае динами-

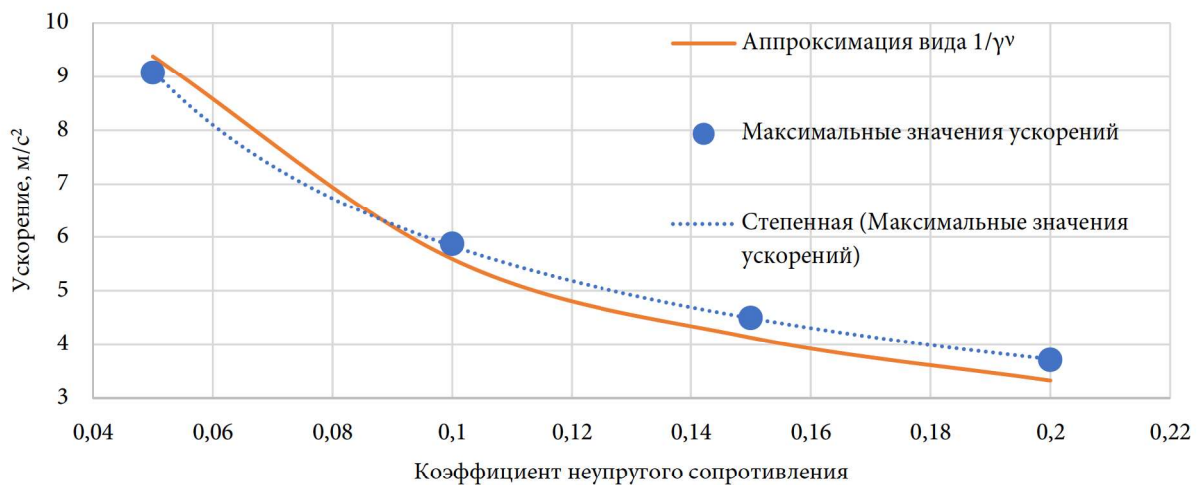


Рис. 4. Сопоставление аппроксимаций с целевыми значениями

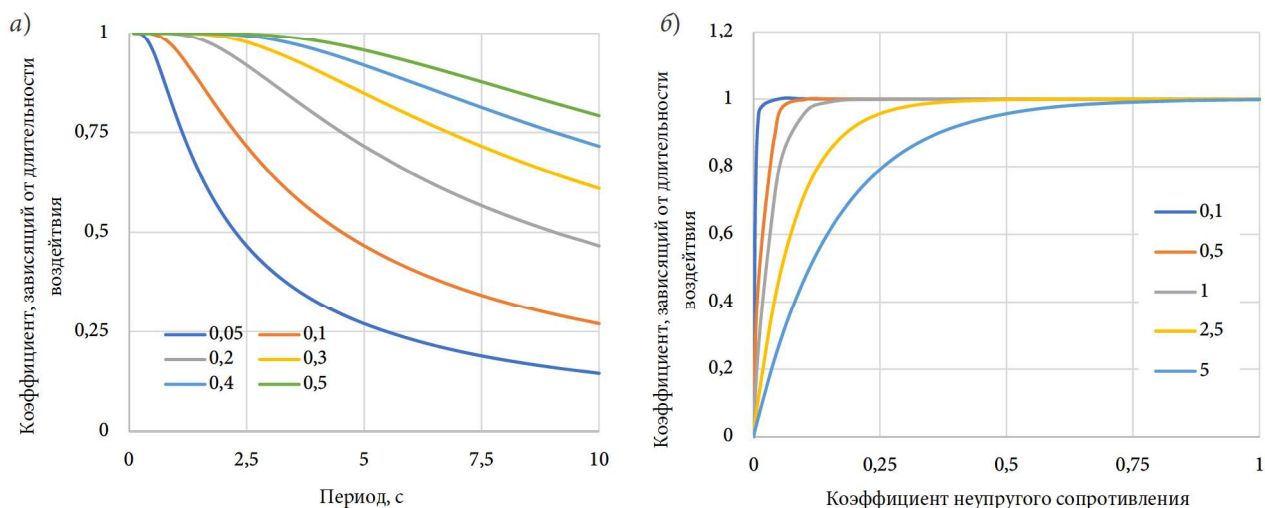


Рис. 5. Зависимость коэффициента, учитывающего длительность воздействия: а — от периодов собственных колебаний при разных значениях коэффициентов неупругого сопротивления; б — от коэффициента неупругого сопротивления при разных значениях периодов собственных колебаний

ческого воздействия вводится повышающая поправка  $K_{\psi}$ .

В предлагаемой методике было показано, что коэффициент  $K(\gamma, T)$ , учитывающий конечность сейсмического воздействия, снижает сейсмическую нагрузку на податливые здания, характеризующиеся слабым рассеиванием энергии. Однако для сооружений со слабым демпфированием увеличивается сам по себе коэффициент динамичности  $\beta(\gamma)$ , поэтому концептуальная логика сохраняется.

Полученные коэффициенты динамичности при малом демпфировании значительно превышают нормативные значения, хотя по данным [3] нормативная методика позволяет получать требуемую сейсмостойкость сооружений, по крайней мере, для условно жестких кирпичных зданий. Для корректной оценки коэффициента динамичности следует обязательно учитывать податливость и демпфирование основания. К расчету следует принимать средневзвешенное значение коэффициента затухания, а наиболее корректной представляется реализация спектра демпфирования пропорционально энергии деформации по формам колебаний.

### Сопоставление результатов с иностранными методиками и перспективы дальнейших исследований

Результаты приведены для периодов собственных колебаний 0,3 с и 3 с, характеризующих соответственно жесткие и гибкие сооружения.

Для перехода от коэффициента динамичности  $\beta(\gamma, T)$  к коэффициенту коррекции спектра относительно базового, или  $K_{\psi}$ , значения коэффициентов динамичности поделены на  $\beta(0,1, T)$ , оно принято эталонным в большинстве нормативных документов.

Результаты сопоставления полученных результатов с имеющимися приведены на рис. 7. Как видно, полученные коэффициенты коррекции спектра относительно базового в целом охватывают возможные значения коэффициентов в зарубежных исследованиях для  $\xi$  от 0 до 0,05. Данные величины коэффициента затухания соответствуют стальным и железобетонным конструкциям. Полученные кривые по-разному ведут себя в области значений  $\xi$  от 0,05 до 0,5, форму полученных кривых в этом диапазоне определяет поправка на скорость раскачивания. Для гибких сооружений параметры затухания в целом сопоставимы с показанными



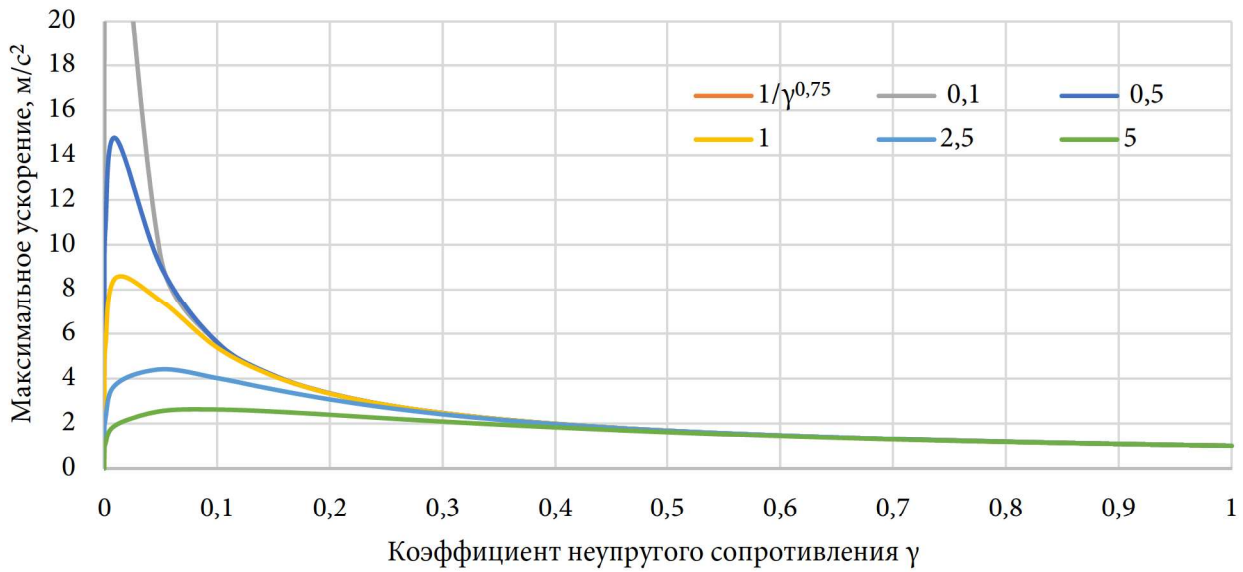


Рис. 6. Зависимость коэффициента динамичности от коэффициента неупругого сопротивления с учетом поправки на конечность воздействия для разных периодов собственных колебаний

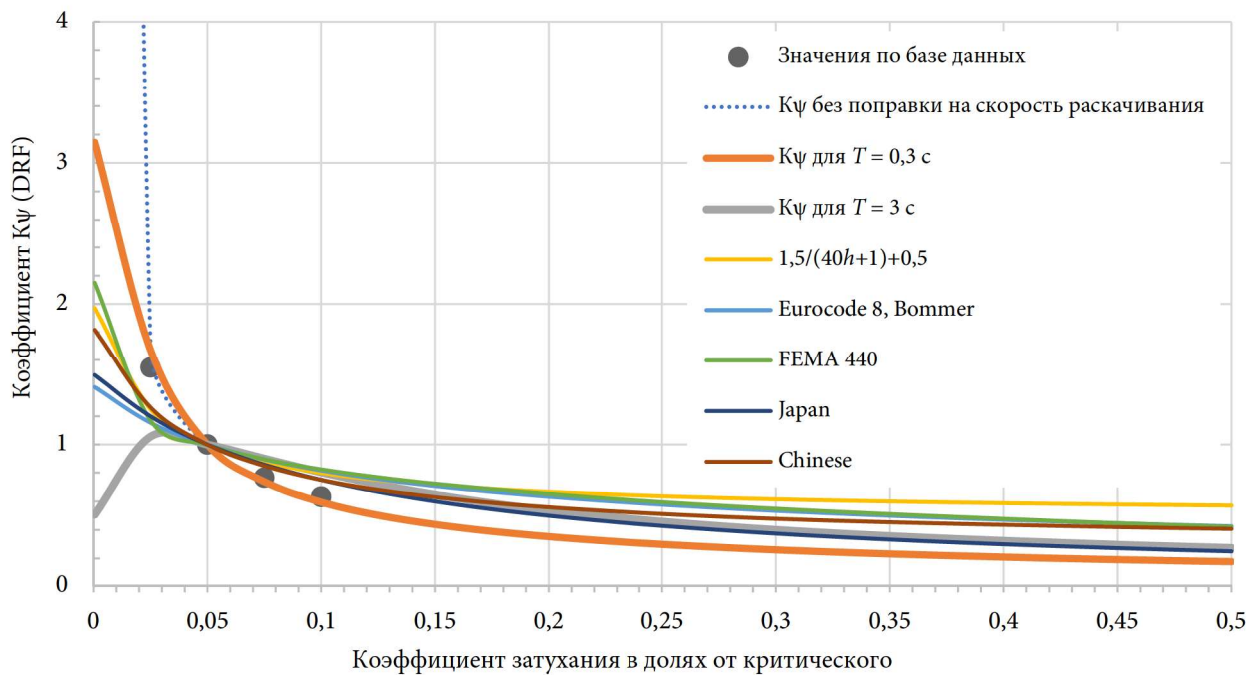


Рис. 7. Сопоставление коэффициентов коррекции спектра относительно базового с данными обработки и результатами иностранных исследователей

зависимостями, а для жестких сооружений поправка на демпфирование занижает нагрузку на сооружение.

В перспективе в целях возможности применения методики для ЛСТ для сильнодемпфированных систем, в том числе с гасителями

колебаний, и для грунтов следует уделить большее внимание оценке коэффициентов динамичности  $\beta(\gamma, T)$  для  $\gamma$  в диапазоне 0,2–0,8.

Также будут ценны исследования, направленные на уточнение величины длительности резонансного воздействия для уточне-



ния влияния конечности акселерограммы на коэффициент динамичности.

### Выводы

В результате работы описаны теоретические положения современной нормативной методики учета затухания. Указаны недостатки нормативной методики при проектировании гражданских сооружений в сейсмически опасных районах. В работе приведены данные иностранных методик учета затухания в системе, а также показано их сопоставление с расчетами по предложенной методике.

Для модели воздействия принята модификация ЛСТ, предложенная А. М. Уздиным в [1, 2], в которой сейсмическое воздействие является резонансным. Для резонанса известны аналитические решения коэффициентов динамики для гармонического воздействия и белого шума.

Автором предложена концепция учета демпфирования без явного назначения коэффициента отклонения затухания от базового  $K_\psi$ . Предлагаемая зависимость коэффициента динамичности  $\beta(\gamma, T)$  выполняет эту функцию сама по себе. Определена численная величина коэффициента динамичности по данным обработки около 200 акселерограмм сильных сейсмических воздействий.

Предложен способ учета конечности воздействия, в определенных случаях корректирующий форму коэффициента динамичности. Учет конечности воздействия оказывает наибольшее влияние на коэффициент динамичности для гибких зданий со слабыми демпфирующими характеристиками.

### Библиографический список

1. Уздин А. М. Что скрывается за линейно-спектральной теорией сейсмостойкости? // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2009. № 2. С. 18–22.
2. Белаиш Т. А., Уздин А. М., Елизаров С. В. Сейсмостойкие конструкции транспортных зданий и сооружений. М.: Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте, 2012. 501 с.
3. Корчинский И. Л. Расчет сооружений на сейсмические воздействия. М.: Гос. изд-во лит. по строительству и архитектуре, 1954. 76 с.
4. Савинов О. А. Экспериментальное исследование вибраций железобетонной рамы, составленной из коротких стержней // Труды научно-исследовательского сектора ЛО треста глубинных работ. Л.: Стройиздат, 1940. С. 36–43.
5. Сорокин Е. С. К теории внутреннего трения при колебаниях упругих систем. М.: Госстройиздат, 1960. 131 с.
6. Солдатов А. Ю., Лебедев В. Л., Семенов В. А. Учет демпфирования при расчетах сооружений на кинематические воздействия // VII Савиновские чтения. Тезисы докладов. Санкт-Петербург, 1–5 июля 2014 г. СПб.: ПГУПС, 2014. С. 21–22.
7. Цейтлин А. И. Об учете внутреннего трения в нормативных документах по динамическому расчету сооружений // Строительная механика и расчет сооружений. 1981. № 4. С. 33–38.
8. Резников А. М. Эквивалентная модель много-массовой системы с вязким и частотно-независимым внутренним трением // Строительная механика и расчет сооружений. 1979. № 4 (124). С. 44–48.
9. Тяпин А. Г. О роли демпфирования в динамических нагрузках при расчете на сейсмические воздействия // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2018. № 1. С. 33–39.
10. Nesterova O. P., Uzdin A. M., Fedorova M. Yu., Freze M. V., Guan Youhai. Taking damping into account in seismic theory problems. A response to the paper by Huating Chen, Ping Tan, Fulin Zhou "An improved response spectrum method for non-classically damped systems" // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2022. № 1. С. 8–26. DOI 10.37153/2618-9283-2022-1-8-26.
11. Newmark N. M., Hall W. J. Earthquake Spectra and Design. Berkeley, CA: Earthquake Engineering and Research Institute, 1982.
12. Rayleigh L. Theory of Sound (two vol.). 1954th ed., Dover Publications, New York, 1877.
13. Soroka W. W. Note on the Relations Between Viscous and Structural Damping Coefficients // Journal of the Aeronautical Sciences. 1949. Vol. 16. Pp. 409–410.
14. Johnson C. D., Kienholz D. A. Finite Element Prediction of Damping in Structures with Constrained Viscoelastic Layers // AIAA Journal. 1982. Vol. 20 (9). Pp. 1284–1290.
15. Blandon C. A. Equivalent viscous damping equations for direct displacement based design. A dissertation, submitted in partial fulfilment of the requirements for the master's degree in Earthquake Engineering. 2004.



16. Tolis S. V., Faccioli E. Displacement design spectra // *Journal of Earthquake Engineering*. 1999. Vol. 3 (1). Pp. 107–125.

17. Kawashima K., Aizawa K. Modification of earthquake response spectra with respect to damping ratio // *Proceedings of the 3rd US National Conference on Earthquake Engineering*. 1986. Vol. 2. Pp. 1107–1116.

18. Rezaeian S., Atik L. A., Kuehn N. M., Abrahamson N., Bozorgnia Y., Mazzoni S., Withers K., Campbell K. Spectral damping scaling factors for horizontal components of ground motions from subduction earthquakes using NGA-Subduction data // *Earthquake Spectra*. 2021. Vol. 37 (4). Pp. 2453–2492. <https://doi.org/10.1177/87552930211027903>.

19. Cicek K., Erkus B. Damping reduction factors for maximum rotated spectra for analysis of base-isolated structures // *International Conference on Earthquake Engineering and Seismology (5ICEES)*. 8–11 October 2019, Ankara, Turkey. 11 p.

20. Uzdin A. M., Prokopovich S. V. Some principles of generating seismic input for calculating structures // *E3S Web of Conferences*. 2020. Vol. 157. 06021. KTTI-2019, <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202015706021>.

21. Курбанов Х. Х., Лин Хонг, Сорокина Г. В., Уздин А. М. Характеристики сейсмического движения дневной поверхности. Их использование в сейсмостойком строительстве // *Геология и геофизика Юга России*. 2022. Т. 12, № 3. С. 34–60. DOI 10.46698/VNC.2022.47.47.003.

22. Напетваридзе Ш. Г. Вопросы усовершенствования существующей методики определения сейсмической нагрузки // *Сейсмостойкость сооружений: сб. ст.* Тбилиси: Мецниерба, 1965. С. 5–36.

23. Яременко В. Г. Выбор оптимальных параметров систем динамической сейсмоизоляции при представлении сейсмического воздействия в виде белого шума // *Сейсмостойкое строительство*. 1983. Вып. 1. С. 18–21.

24. Клаф Р., Пензиен Дж. Динамика сооружений / пер. с англ. М.: Стройиздат, 1979. 320 с.

25. Петров А. А. Оценка сейсмостойкости конструкций на основе использования энергетической меры воздействия // *ЭИ «Строительство и архитектура. Сейсмостойкое строительство»*. ВНИИТПИ. М., 1993. Вып. 6. С. 2–7.

## References

1. Uzdin A. M. *Chto skryvaetsya za lineynno-spektral'noy teoriey seysmostoykosti?* [What hides behind the linear-spectral theory of seismic stability?]. *Seysmostoykoe stroitel'stvo. Bezopasnost' sooruzheniy – Seismic-Resistant Construction. Safety of Structures*, 2009, no. 2, pp. 18–22.

2. Belash T. A., Uzdin A. M., Elizarov S. V. *Seysmostoykie konstruksii transportnykh zdaniy i sooruzheniy* [Seismic resistant structures of transport buildings and structures]. Moscow, Uchebno-metodicheskiy tsentr po obrazovaniyu na zheleznodorozhnom transporte Publ., 2012, 501 p.

3. Korchinskiy I. L. *Raschet sooruzheniy na seysmicheskie vozdeystviya* [Calculation of structures for seismic effects]. Moscow, Gos. izd-vo lit. po stroitel'stvu i arkhitekture Publ., 1954, 76 p.

4. Savinov O. A. *Eksperimental'noe issledovanie vibratsiy zhelezobetonnoy ramy, sostavlennoy iz korotkikh sterzhney* [Experimental study of oscillations of a reinforced concrete frame composed of short rods]. *Trudy nauchno-issledovatel'skogo sektora LO tresta glubinnnykh rabot* [Proceedings of the research sector of the LO Trust of deep works]. Leningrad, Stroyizdat Publ., 1940, pp. 36–43.

5. Sorokin E. S. *K teorii vnutrennego treniya pri kolebaniyakh uprugikh sistem* [To the theory of internal friction in oscillations of elastic systems]. Moscow, Gosstroyizdat Publ., 1960, 131 p.

6. Soldatov A. Yu., Lebedev V. L., Semenov V. A. *Uchet dempfirovaniya pri raschetakh sooruzheniy na kinematicheskie vozdeystviya* [Damping consideration in calculations of structures for kinematic effects]. *VII Savinovskie chteniya. Tezisy dokladov* [VII Savinovskie Readings. Theses of reports]. St. Petersburg, PGUPS Publ., 2014, pp. 21–22.

7. Tseytlin A. I. *Ob uchete vnutrennego treniya v normativnykh dokumentakh po dinamicheskomu raschetu sooruzheniy* [On the account of internal friction in normative documents on dynamic calculation of structures]. *Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzheniy – Structural Mechanics and Calculation of Structures*, 1981, no. 4, pp. 33–38.

8. Reznikov A. M. *Ekvivalentnaya model' mnogomassovoy sistemy s vyazkim i chastotno-nezavisimym vnutrennim treniem* [Equivalent model of a multi-mass system with viscous and frequency-independent internal friction]. *Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzheniy – Structural Mechanics and Calculation of Structures*, 1979, no. 4 (124), pp. 44–48.

9. Tyapin A. G. *O roli dempfirovaniya v dinamicheskikh nagruzkakh pri raschete na seysmicheskie vozdeystviya* [About the role of damping in dynamic loads at calculation on seismic effects]. *Seysmostoykoe stroitel'stvo. Bezopasnost' sooruzheniy – Seismic-resistant construction. Safety of Structures*, 2018, no. 1, pp. 33–39.

10. Nesterova O. P., et al. Consideration of damping in seismic theory problems. A response to the paper by Huating Chen, Ping Tan, Fulin Zhou “An improved response spectrum method for non-classically damped systems”. *Seysmostoykoe stroitel'stvo. Bezopasnost' sooruzheniy – Seismic-resistant construction. Safety of*



*Structures*, 2022, no. 1, pp. 8–26. DOI 10.37153/2618-9283-2022-1-8-26.

11. Newmark N. M., Hall W. J. *Earthquake spectra and design*. Berkeley, CA, Earthquake Engineering and Research Institute Publ., 1982.

12. Rayleigh L. *Theory of sound (two vols.)*. Dover Publications, New York, 1877.

13. Soroka W. W. Note on the relations between viscous and structural damping coefficients. *Journal of the Aeronautical Sciences*, 1949, vol. 16, pp. 409–410.

14. Johnson C. D., Kienholz D. A. Finite element prediction of damping in structures with constrained visco-elastic layers. *AIAA Journal*, 1982, vol. 20 (9), pp. 1284–1290.

15. Blandon C. A. *Equivalent viscous damping equations for direct displacement based design*. A dissertation, submitted in partial fulfillment of the requirements for the master's degree in Earthquake Engineering, 2004.

16. Tolis S. V., Faccioli E. Displacement design spectra. *Journal of Earthquake Engineering*, 1999, vol. 3 (1), pp. 107–125.

17. Kawashima K., Aizawa K. Modification of earthquake response spectra with respect to damping ratio. *Proceedings of the 3-rd US National Conference on Earthquake Engineering*, 1986, vol. 2, pp. 1107–1116.

18. Rezaeian S., et al. Spectral damping scaling factors for horizontal components of ground motions from subduction earthquakes using NGA-Subduction data. *Earthquake Spectra*, 2021, vol. 37 (4), pp. 2453–2492. Available at: <https://doi.org/10.1177/87552930211027903>.

19. Cicek K., Erkus B. Damping reduction factors for maximum rotated spectra for analysis of base-isolated structures. *International Conference on Earthquake Engineering and Seismology (5ICEES)*, 8–11 October 2019, Ankara, Turkey, 11 p.

20. Uzdin A. M., Prokopovich S. V. Some principles of generating seismic input for calculating structures. *E3S Web of Conferences*, 2020, vol. 157, 06021. KTTI-2019, Available at: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202015706021>.

21. Kurbanov Kh. Kh., Lin Khong, Sorokina G. V., Uzdin A. M. *Kharakteristiki seysmicheskogo dvizheniya dnevnoy poverkhnosti. Ikh ispol'zovanie v seysmostoykom stroitel'stve* [Characteristics of seismic motion of the day surface and their use in earthquake-resistant construction]. *Geologiya i geofizika Yuga Rossii – Geology and Geophysics of the South of Russia*, 2022, vol. 12, no. 3, pp. 34–60. DOI 10.46698/VNC.2022.47.47.003.

22. Napetvaridze Sh. G. *Voprosy usovershenstvovaniya sushchestvuyushchey metodiki opredeleniya seysmicheskoy nagruzki* [Issues of improvement of the existing methodology of seismic load determination]. *Sb. st. «Seysmostoykost' sooruzheniy»* [Coll. of articles. "Seismic resistance of structures"]. Tbilisi, Metsnierba Publ., 1965, pp. 5–36.

23. Yaremenko V. G. *Vybor optimal'nykh parametrov sistem dinamicheskoy seysmoizolyatsii pri predstavlenii seysmicheskogo vozdeystviya v vide belogo shuma* [Selection of optimal parameters of dynamic seismic isolation systems at representation of seismic impact in the form of white noise]. *Seysmostoykoe stroitel'stvo – Seismic-Resistant Construction*, 1983, iss. 1, pp. 18–21.

24. Klaf R., Penzien Dzh. *Dinamika sooruzheniy* [Dynamics of structures]. Transl. from English. Moscow, Stroyizdat Publ., 1979, 320 p.

25. Petrov A. A. *Otsenka seysmostoykosti konstruktiv na osnove ispol'zovaniya energeticheskoy mery vozdeystviya* [Estimation of seismic resistance of structures on the basis of using the energy measure of impact]. *EI «Stroitel'stvo i arkhitektura. Seysmostoykoe stroitel'stvo»* [EI "Construction and Architecture. Seismic-resistant construction"]. Moscow, VNIINTPI Publ., 1993, iss. 6, pp. 2–7.