СТРОИТЕЛЬНАЯ МЕХАНИКА ИНЖЕНЕРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ И СООРУЖЕНИЙ
STRUCTURAL MECHANICS OF ENGINEERING CONSTRUCTIONS AND BUILDINGS

2024. 20(3). 241–254

ISSN 1815-5235 (Print), 2587-8700 (Online)
HTTP://JOURNALS.RUDN.RU/STRUCTURAL-MECHANICS

СЕЙСМОСТОЙКОСТЬ СООРУЖЕНИЙ
SEISMIC RESISTENCE

DOI: 10.22363/1815-5235-2024-20-3-241-254
УДК 634.075
EDN: QRGONJ

Научная статья / Research article

Методика построения расчетных спектров максимальных реакций на землетрясения

Е.Н. Курбацкий✉, **Е.А. Пестрякова**, **Ш.А. Хуссейн**

Российский университет транспорта, *Москва, Россия*
✉ dynamic.miit@gmail.com

История статьи

Поступила в редакцию: 4 марта 2024 г.
Доработана: 20 мая 2024 г.
Принята к публикации: 27 мая 2024 г.

Заявление о конфликте интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Вклад авторов

Нераздельное соавторство.

Аннотация. В настоящее время спектр максимальных реакций представляет собой основное понятие в сейсмической инженерии и является удобным средством для представления воздействия землетрясений на сооружения. Он также дает возможность для применения на практике положений динамики конструкций при проектировании конструкций и разработке требований в строительных нормах и правилах. К сожалению, российским проектировщикам эта концепция практически не известна и не используется в расчетах на сейсмостойкость. В российских нормах при расчетах на сейсмостойкость используется концепция динамических коэффициентов, не имеющая физического смысла для землетрясений. Отсутствие в российских нормативных документах по расчету сооружений на сейсмостойкость понятия спектров ответов, по нашему мнению, является серьезной ошибкой. Представление спектров реакций максимальных перемещений, скоростей и ускорений в логарифмических координатах на одном графике позволило выявить закономерности практически любых сейсмических воздействий, что нашло широкое применение в нормативных документах многих стран.

Ключевые слова: коэффициенты динамичности, спектры ответов, комбинированные спектры, сейсмические воздействия

Для цитирования

Курбацкий Е.Н., Пестрякова Е.А., Хуссейн Ш.А. Методика построения расчетных спектров максимальных реакций на землетрясения // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2024. Т. 20. № 3. С. 241–254. http://doi.org/10.22363/1815-5235-2024-20-3-241-254

Курбацкий Евгений Николаевич, доктор технических наук, академик РАТ, профессор кафедры мостов и тоннелей, Российский университет транспорта (МИИТ), Москва, Россия; eLIBRARY SPIN-код: 8993-9910, ORCID: 0000-0002-8593-0340; E-mail: dynamic.miit@gmail.com

Пестрякова Екатерина Алексеевна, кандидат технических наук, доцент кафедры мостов и тоннелей, Российский университет транспорта (МИИТ), Москва, Россия; eLIBRARY SPIN-код: 6339-2821, ORCID: 0000-0003-3441-1011; E-mail: kate.pestriakova@gmail.com

Хуссейн Шахд Алрмиш, аспирант кафедры мостов и тоннелей, Российский университет транспорта (МИИТ), Москва, Россия; ORCID: 0009-0004-8106-9698; E-mail: shahdalrmish@yandex.ru

© Курбацкий Е.Н., Пестрякова Е.А., Хуссейн Ш.А., 2024

This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License
https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode

Method of Constructing Maximum Design Response Spectra to Earthquakes

Evgeny N. Kurbatskiy✉, **Ekaterina A. Pestriakova**, **Shahd A. Hussein**

Russian University of Transport, *Moscow, Russia*
✉ dynamic.miit@gmail.com

Article history
Received: March 4, 2024
Revised: May 20, 2024
Accepted: May 27, 2024

Conflicts of interest
The authors declare that there is no conflict of interest.

Authors' contribution
Undivided co-authorship.

Abstract. At present, the maximum response spectrum is a basic concept in seismic engineering, providing a convenient means for representing the impact of earthquakes on structures. It also provides a practical approach to the application of structural dynamics principles to the design of structures and the development of requirements in building codes and regulations. Unfortunately, this concept is practically unknown to Russian designers and is not used in seismic resistance calculations. In Russian standards, the concept of dynamic coefficients is used in seismic resistance calculations, which has no physical meaning for earthquakes. The absence of the concept of response spectra in Russian regulatory documents on seismic resistance calculations of structures, in our opinion, is a serious mistake. The presentation of response spectra of maximum displacements, velocities and accelerations in logarithmic coordinates on a single graph made it possible to identify patterns in almost any seismic impacts, which has found wide application in regulatory documents of many countries.

Keywords: dynamic coefficients, response spectra, combined spectra, seismic effects

For citation
Kurbatskiy E.N., Pestriakova E.A., Hussein Sh.A. Method of constructing maximum design response spectra to earthquakes. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings.* 2024;20(3):241–254. (In Russ.) http://doi.org/10.22363/1815-5235-2024-20-3-241-254

1. Введение

Идея использования спектров максимальных реакций для представления сейсмических воздействий была изложена в 1926 г. в бюллетене Института исследования землетрясений Токийского императорского университета в статье первого директора Института К.А. Сюэхиро [1].

Позднее в 1932 г. важную роль в широком признании концепции спектра реакции на землетрясения как практического средства, характеризующего движение грунта и его воздействий на конструкции, сыграли американские ученые [2; 3]. Подробно история возникновения и развития концепции спектров ответов изложена в [4].

В нормах СССР и РФ для оценки сейсмических воздействий используется понятие «спектральный коэффициент динамичности» — β, который является неудачным аналогом спектров реакций. Отметим, что концепция спектров реакций в нормах расчета на сейсмостойкость принята более чем в 50 странах. Известный американский ученый A.K. Chopra в [5] отметил, что «концепция спектров ответов хорошо интегрировалась в теорию и практику инженерных расчетов сооружений на сейсмостойкость, но многие исследователи и инженеры, использующие эту концепцию, не знают проис-

Evgeny N. Kurbatskiy, Doctor of Sciences in Technology, Academician of the Russian Academy of Transport, Professor Department of Bridges and Tunnels, Russian University of Transport (MIIT), Moscow, Russia; eLIBRARY SPIN-code: 8993-9910, ORCID: 0000-0002-8593-0340; E-mail: dynamic.miit@gmail.com

Ekaterina A. Pestriakova, Candidate of Sciences in Technology, Assistant Professor, Department of Bridges and Tunnels, Russian University of Transport (MIIT), Moscow, Russia; eLIBRARY SPIN-code: 6339-2821, ORCID: 0000-0003-3441-1011; E-mail: kate.pestriakova@gmail.com

Shahd A. Hussein, Postgraduate student, Department of Bridges and Tunnels, Russian University of Transport (MIIT), Moscow, Russia; ORCID: 0009-0004-8106-9698; E-mail: shahdalrmish@yandex.ru

хождения концепции. Для того чтобы исправить это положение, сотрудниками кафедры Мосты и тоннели РУТ (МИИТ) были опубликованы критические статьи и монография «Спектры Фурье и спектры ответов на землетрясения».

Спектры максимальных реакций (ответов) — одна из наиболее важных, полезных и широко используемых концепций в теории и практике расчетов сооружений на сейсмостойкость. В настоящее время эта концепция используется практически во всех зарубежных нормативных документах и руководствах по расчету сооружений на сейсмостойкость[1]. Ввиду того что в нормах РФ концепция спектров максимальных реакций не нашла применения для дальнейшего изложения, будем руководствоваться положениями UBC[2] (Единый строительный кодекс), который был признан на международным уровне в качестве эталона в области оценки сейсмостойкости сооружений. Во многих странах, и в частности в Сирийской Арабской Республике, положения UBC были приняты за основу при разработке национальных строительных норм.

1. Концепция спектров максимальных реакций

1.1. Спектр максимальных перемещений

Для определения реакции системы с одной степенью свободы на кинематическое возбуждение основания используется расчетная схема, представленная на рис. 1.

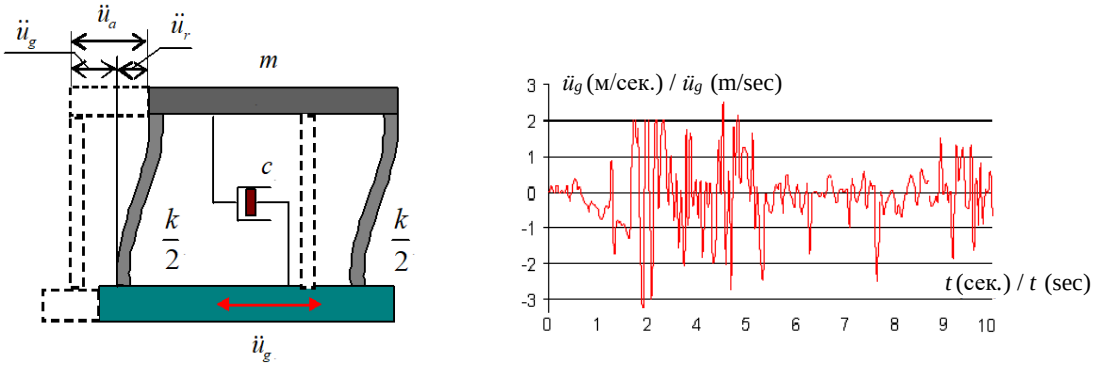

Рис. 1. Расчетная схема системы с одной степенью свободы и акселерограмма колебаний поверхности грунта при землетрясении
И с т о ч н и к : выполнено Е.Н. Курбацким
Figure 1. Single-degree of freedom system and ground acceleration during earthquake
S o u r c e : compiled by E.N. Kurbatskiy

Дифференциальное уравнение движения такой системы имеет вид

$$m\ddot{u}_a + c\dot{u}_r + ku_r = 0. \tag{1}$$

Учитывая, что в (1) $\ddot{u}_a = \ddot{u}_g + \ddot{u}_r$,

где $\ddot{u}_a$ — абсолютное ускорение, $\ddot{u}_g$ — переносное ускорение и $\ddot{u}_r$ — относительное ускорение и $\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}$ — частота собственных колебаний системы без учета демпфирования, можно представить в виде

[1] Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings. Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance Part 2: Bridges. BS 1998-2:2005+A1:2009. Seismic Analysis of Safety-Related Nuclear Structures and Commentary ASCE 4-98. Seismic Analysis of Safety-Related Nuclear Structures ASCE/SEI 4-16.

[2] IBC, International Building Code Council, Washington, DC, 2015.

$$\ddot{u}_r + 2\xi\omega\dot{u}_r + \omega^2 u_r = -\ddot{u}_g \,, \tag{2}$$

$\xi = \dfrac{c}{c_{cr}} = \dfrac{c}{2m\omega}$ — относительный коэффициент демпфирования (отношение реального демпфирования к критическому). Величина относительного коэффициента демпфирования строительных конструкций находится в пределах $0,005 \le \xi \le 0,07$.

Перемещения для систем с разными собственными частотами при воздействии землетрясений можно определить из решения уравнения (2) в виде интеграла Дюамеля:

$$u(t) = \frac{1}{\omega}\int_0^t \ddot{u}_g(\tau)\sin\omega(t-\tau)e^{-\omega\xi(t-\tau)}d\tau \tag{3}$$

В качестве примера будем использовать акселерограмму измитского землетрясения (рис. 2. Турция, 1999).

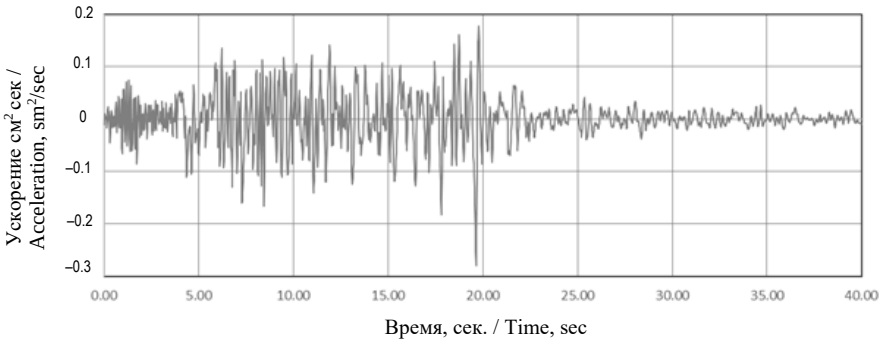

Рис. 2. Акселерограмма колебаний поверхности грунта при землетрясении Измит, Турция, 1999 г.
И с т о ч н и к : выполнено Ш.А. Хуссейн

Figure 2. Ground acceleration during earthquake Izmit, Türkiye, 1999
S o u r c e : compiled by Sh.A. Hussein

Для построения спектра максимальных перемещений необходимо определить, как будут реагировать на это землетрясение системы с разными собственными периодами колебаний и выбрать в каждом случае только максимальные значения.

Графики перемещений систем с одной степенью свободы с разными периодами собственных колебаний представлены на рис. 3–7.

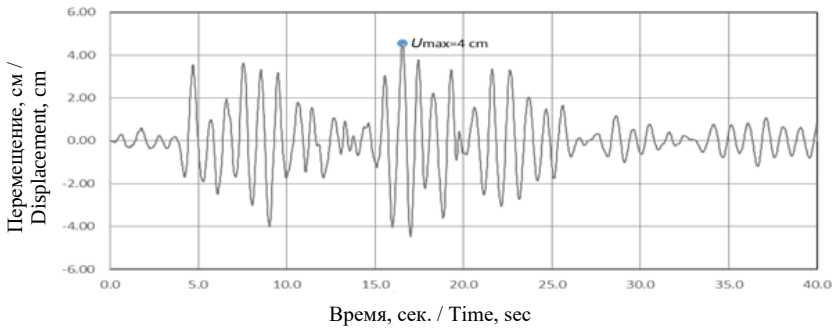

Рис. 3. Уравнения вынужденных колебаний системы, собственный период колебаний которой T = 1 сек.
И с т о ч н и к : выполнено Ш.А. Хуссейн

Figure 3. Deformation response of SDOF system with T = 1 sec to Izmit earthquake
S o u r c e : compiled by Sh.A. Hussein

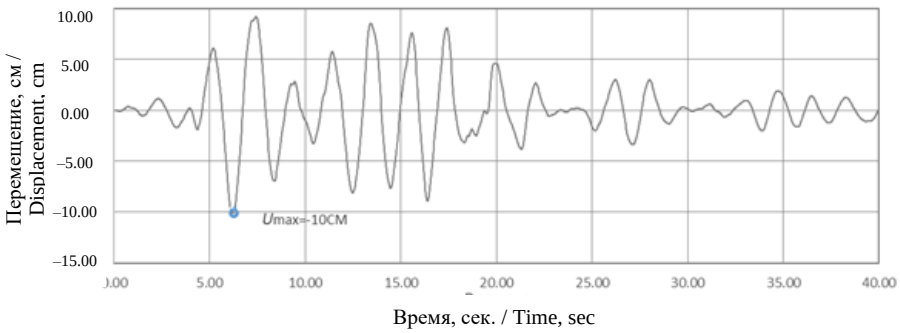

Рис. 4. Уравнения вынужденных колебаний системы, собственный период колебаний которой $T = 2$ сек.
И с т о ч н и к : выполнено Ш.А. Хуссейн

Figure 4. Deformation response of SDOF system with $T = 2$ sec to Izmit earthquake
S o u r c e : compiled by Sh.A. Hussein

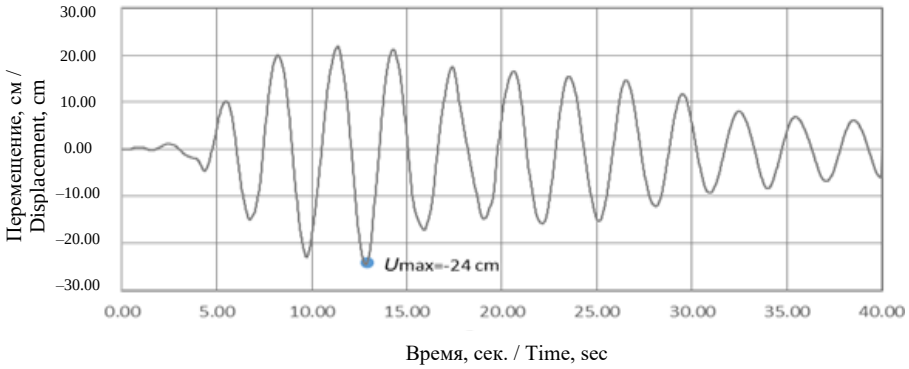

Рис. 5. Уравнения вынужденных колебаний системы, собственный период колебаний которой $T = 3$ сек.
И с т о ч н и к : выполнено Ш.А. Хуссейн

Figure 5. Deformation response of SDOF system with $T = 3$ sec to Izmit earthquake
S o u r c e : compiled by Sh.A. Hussein

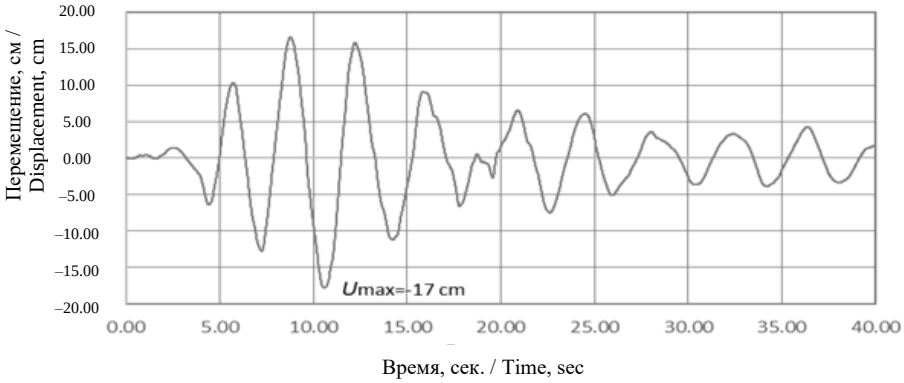

Рис. 6. Уравнения вынужденных колебаний системы, собственный период колебаний которой $T = 4$ сек.
И с т о ч н и к : выполнено Ш.А. Хуссейн

Figure 6. Deformation response of SDOF system with $T = 4$ sec to Izmit earthquake
S o u r c e : compiled by Sh.A. Hussein

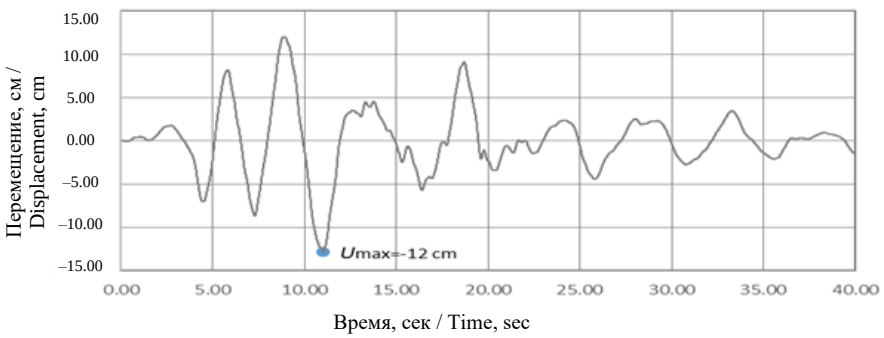

Рис. 7. Уравнения вынужденных колебаний системы, собственный период колебаний которой T = 5 сек.
И с т о ч н и к : выполнено Ш.А. Хуссейн

Figure 7. Deformation response of SDOF system with T = 5 sec to Izmit earthquake
S o u r c e : compiled by Sh.A. Hussein

Для построения спектра максимальных перемещений используются только значения максимальных перемещений, соответствующих заданным периодам собственных колебаний. При построении спектров максимальных перемещений применяются абсолютные значения.

График спектра максимальных перемещений представлен на рис. 8.

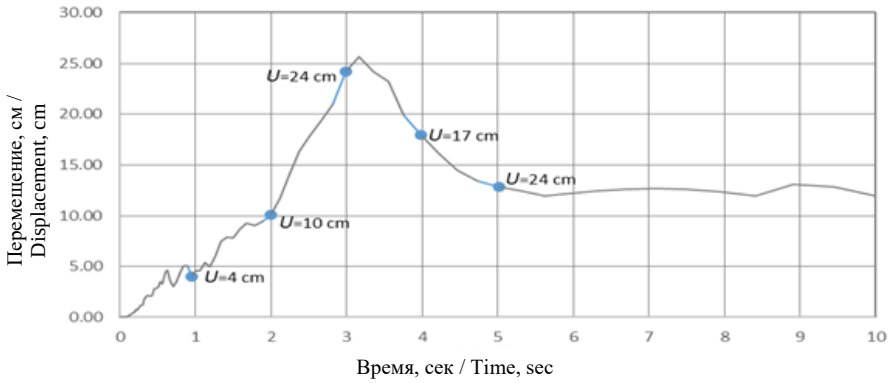

Рис. 8. Спектр максимальных перемещений (см) для систем с коэффициентом демпфирования ζ = 0,05 при воздействии землетрясения Измит
И с т о ч н и к : выполнено Ш.А. Хуссейн

Figure 8. Deformation response spectra with damping ratio ζ = 0.05 to Izmit earthquake
S o u r c e : compiled by Sh.A. Hussein

2. Спектры и псевдоспектры максимальных реакций (ответов) скоростей и ускорений

Спектры максимальных скоростей и ускорений можно определить, используя первую и вторую производные интеграла Дюамеля (3).

Доказано [2; 3], что для систем с коэффициентами демпфирования, определяемыми диапазоном $0 < \xi < 0{,}2$, для построения спектров максимальных реакций можно использовать приближенные соотношения

$$S_{pv}(\omega,\xi) = \omega S_d(\omega,\xi) = \frac{S_{pa}(\omega,\xi)}{\omega}. \quad (4)$$

Так как выражения $S_{pv}(\omega,\xi)$ и $S_{pa}(\omega,\xi)$ отличаются от реальных спектров $S_v(\omega,\xi)$ и $S_{av}(\omega,\xi)$, их принято называть псевдоспектрами.

Таким образом, для построения спектров достаточно определить только спектр псевдоскоростей по формуле

$$S_{pv}(\omega,\xi)=\left[\int_0^t \ddot{u}(\tau)\sin\omega(t-\tau)e^{-\omega\xi(t-\tau)}d\tau\right]_{\max}. \tag{5}$$

Кроме того, псевдоспектр скоростей выбирается в качестве исходного ввиду того, что псевдоспектр максимальных скоростей практически равен амплитудному спектру Фурье ускорений колебаний грунта, что существенно ускоряет и упрощает обработку сейсмической информации.

Ввиду того что сравнение графиков спектров и псевдоспектров скоростей и ускорений, показывающих их несущественное отличие, приводится в многочисленных источниках, в частности в [2–4], примеры приводить не будем.

Каждый из спектров максимальных реакции: перемещений, псевдоскоростей и псевдоускорений на заданное колебание грунта содержит одну и ту же информацию, не больше и не меньше. Три спектра — просто разные способы представления одной и той же информации о реакции сооружений. Возникает вопрос зачем нужны эти три спектра, если они содержат одинаковую информацию?

Ответ: во-первых, каждый спектр напрямую представляет важную физическую величину. Спектр перемещений определяет максимальные деформации системы. Спектр псевдоскоростей определяет максимальную энергию, накопленную системой при землетрясении. Спектр псевдоускорений определяет пиковое значение эквивалентной статической силы при сдвиге основания.

Во-вторых, все три спектра можно представить на одном графике для более удобного аппроксимирования для целей проектирования. Для этого особенно полезен комбинированный график, представляющий все три спектральные величины. В зарубежных источниках такой спектр получил название «Комбинированный D-V-A спектр», соответствующий первым буквам слов Displacement (перемещение), Velocity (скорость) и Acceleration (ускорение). Впервые графики такого типа были построены учеными A.S. Veletsos и N.M. Newmark в 1960 г. [6].

Для построения комбинированных графиков строится специальная логарифмическая сетка. Пример такой сетки приводится на рис. 9.

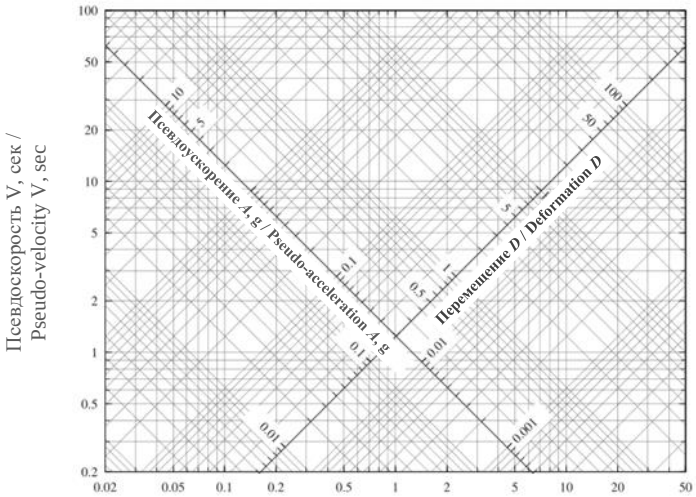

Рис. 9. Логарифмическая сетка для построения комбинированного спектра D-V-A
Источник: Чопра А.К. [7]

Figure. 9. Logarithmic grid for constructing a combined D-V-A spectrum
Source: Chopra A.K. [7]

3. Комбинированный трехординатный график максимальных реакций в логарифмических координатах

Ввиду того что в российских нормативных документах о спектрах перемещений, скоростей и ускорений даже не упоминается, подробно опишем методику построения координатной сетки для комбинированного трехординатного графика спектров реакций.

Для построения четырехкоординатного графика максимальных реакций воспользуемся следующими соотношениями:

$$S_{pv} = \omega S_d \quad \text{и} \quad S_{pv} = \frac{S_{pa}}{\omega}, \tag{6}$$

где S_d — спектр максимальных перемещений; S_{pv} — псевдоспектр максимальных скоростей и S_{pa} — псевдоспектр максимальных ускорений при воздействии реального землетрясения.

3.1. Методика построения трехординатной сетки координат в зависимости от круговой частоты

Предварительно отметим, что графики, в зависимости от круговой частоты, на практике используются реже по сравнению с графиками в зависимости от периода собственных колебаний. Но графики, в которых по горизонтальной оси откладываются собственные частоты, более наглядны и удобны при объяснении. Поэтому начнем объяснение именно с этих графиков.

Представим псевдоспектр максимальных скоростей как функцию круговой частоты ω в логарифмических координатах: $\log S_v$ ордината и log(ω) абсцисса.

Выбрав точку $S_v = 1$ и $\omega = 1$ в качестве начала координат, проведем вертикальную и горизонтальную оси с одинаковым логарифмическим масштабом (рис. 10).

Для построения координатной сетки для псевдоспектра ускорений рассмотрим выражение

$$\log S_{pv} = -\log\omega + \log S_{pa}, \tag{7}$$

которое следует из уравнений (6) при логарифмировании.

При постоянном значении параметра S_{pa} уравнение (7) представляет собой прямую линию, направленную под углом –45 градусов. Линии координатной сетки, соответствующие постоянным и различным значениям спектра S_{pa}, будут также направлены под углом –45 градусов. Ось ординат спектра S_{pa} будет направлена перпендикулярно этим линиям (рис. 10). Для упрощения введем следующие обозначения для точек на шкалах: *A* — для шкалы псевдоускорений, *V* — шкалы пседоскоростей и *D* — для шкалы перемещений.

Установим соответствие между шкалами.

Точке *A* на оси S_{pa} должны соответствовать координаты $S_{pv} = \sqrt{A}$ и $\omega = \sqrt{A}$, для того чтобы удовлетворить условию $S_{pa} = \omega S_{pv}$.

Значения координат должны быть равными, так как ось S_{pa} направлена под углом 45 градусов.

На рис. 10 в качестве примера жирными линиями отмечены три точки с координатами [(3)(9)(3)]; [(2)(4)(2) и [(0,2)(0,004)(0,2)].

Для построения координатной сетки для перемещений рассмотрим выражение

$$\log S_{pv} = \log\omega + \log S_d, \tag{8}$$

которое также следует из уравнения (7) при логарифмировании.

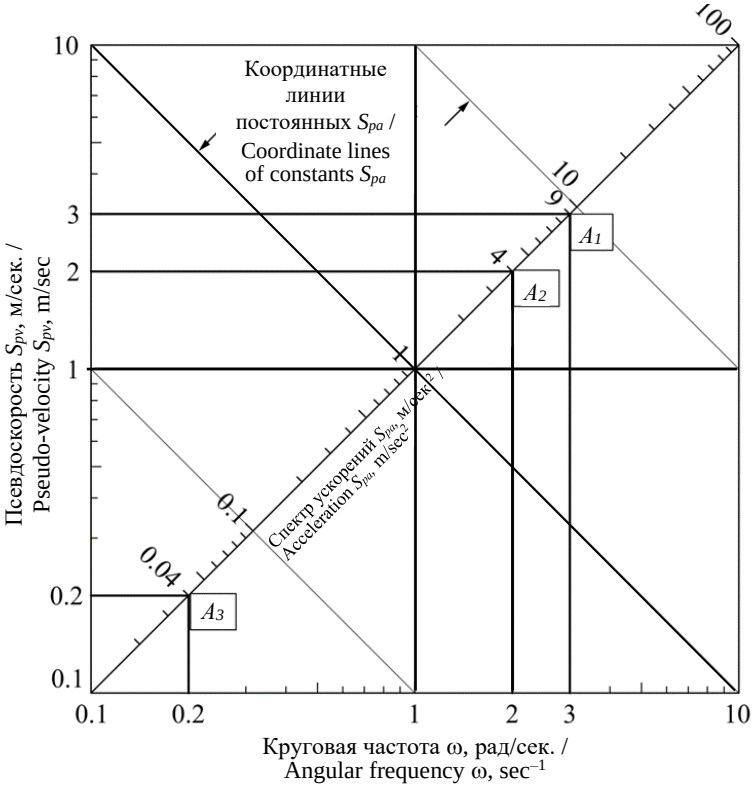

Рис. 10. Координатная сетка для псевдоспектров ускорений в зависимости от круговой частоты, рад/сек.
И с т о ч н и к : выполнено Е.А. Пестряковой

Figure 10. Coordinate grid for pseudo-spectra of accelerations depending on the angular frequency, rad/sec
S o u r c e : compiled by E.A. Pestriakova

При постоянном значении S_d, уравнение (7) представляет собой прямую линию, направленную под углом 45 градусов. Таким образом, линии координатной сетки, соответствующие постоянным значениям спектра S_d, будут направлены также под углом 45 градусов. Ось ординат спектра S_d будет направлена перпендикулярно этим линиям (рис. 10).

Установим соответствие между шкалами.

Точке D на оси S_d должны соответствовать координаты $S_{pa} = \sqrt{D}$ и $\omega = 1/\sqrt{D}$ для того, чтобы удовлетворить уравнению $S_d = \dfrac{S_{pv}}{\omega}$, учитывая, что ось S_d направлена под углом –45 градусов. На рис. 11 в качестве примера жирными линиями отмечены три точки с координатами [(2)(4)(0,5)]; [(1)(1)(1) и [(0,2)(0,004)(5,0)].

Объединяя оба графика, представим координатную сетку для комбинированного трехординатного спектра (рис. 12), принимая во внимание четыре координатные оси: две горизонтальные и вертикальную и две оси, направленные под углом 45 градусов и –45 градусов. В некоторых литературных источниках графики, построенные таким образом, называют комбинированными четырехкоординатными графиками.

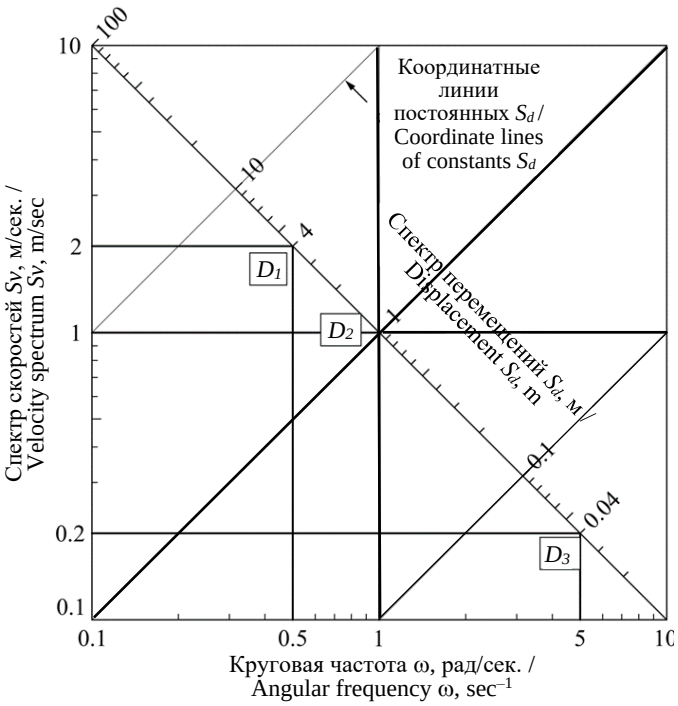

Рис. 11. Координатная сетка для перемещений в зависимости от круговой частоты
И с т о ч н и к : выполнено Е.А. Пестряковой

Figure 11. Coordinate grid for displacements depending on the angular frequency
S o u r c e : compiled by E.A. Pestriakova

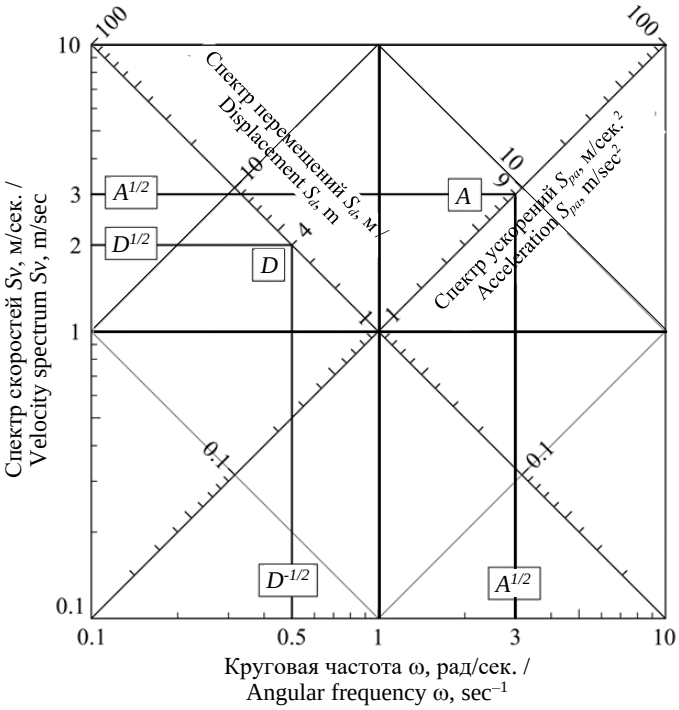

Рис. 12. Координатная сетка для построения объединенного трехординатного спектра максимальных перемещений, псевдоскоростей и псевдоускорений в зависимости от круговой частоты, рад/сек.
И с т о ч н и к : выполнено Е.А. Пестряковой

Figure 12. Coordinate grid for constructing a combined three-coordinate spectrum of maximum displacements, velocities and accelerations depending on the angular frequency, rad/sec.
S o u r c e : compiled by E.A. Pestriakova

3.2. Методика построения трехординатной системы координат в зависимости от периода собственных колебаний

Графики спектров максимальных реакций можно построить в зависимости от круговой частоты ω (рад/сек.), циклической частоты *f* (герцы) и в зависимости от периода собственных колебаний *T*. Все эти графики представляют одну и ту же информацию и имеют право на существование. Для инженеров наиболее удобным, понятным и привлекательным понятием является период собственных колебаний. Поэтому в нормативных документах наиболее часто используются спектры максимальных реакций в зависимости от периода собственных колебаний.

Для построения спектров максимальных реакций в зависимости от периодов собственных колебаний используется методика, аналогичная медодике, подробно изложенной в предыдущем разделе. Поэтому отметим только основное отличие.

В уравнениях (6) круговая частота заменяется выражением $\omega = \dfrac{2\pi}{T}$. В результате получим

$$S_{pv} = \frac{2\pi}{T} S_d \quad \text{и} \quad S_{pv} = T\,\frac{S_{pa}}{2\pi}. \tag{9}$$

Так как период собственных колебаний *T* является величиной, обратной круговой частоте ω, направление горизонтальной оси меняется на противоположное. Кроме того, наличие множителя 2π приводит к смещению графиков по горизонтали.

Пример координатной сетки для трехординатного графика максимальных спектров ответов приведен на рис. 13.

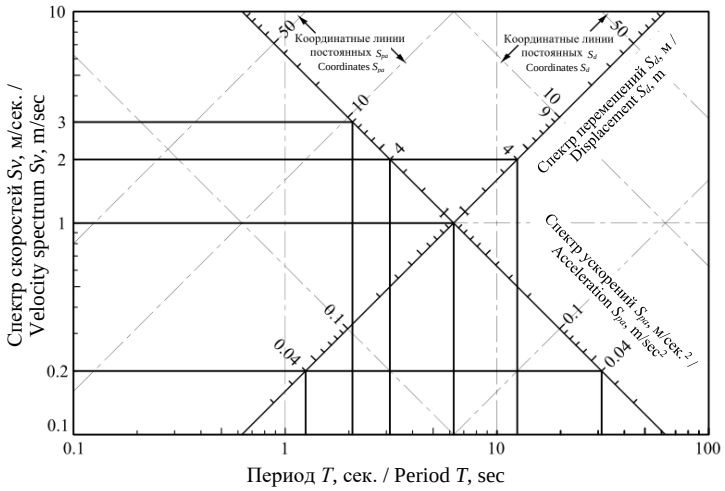

Рис. 13. Координатная сетка для для трехординатного графика максимальных спектров ответов
И с т о ч н и к : выполнено: Е.А. Пестряковой

Figure 13. Coordinate grid for a three-coordinate graph of maximum response spectra
S o u r c e : compiled by E.A. Pestriakova

4. Преимущества представления спектров реакций в трехординатной системе координат

Спектры различных землетрясений отличаются между собой. Тем не менее представление спектров реакций максимальных перемещений, скоростей и ускорений в логарифмических координатах на одном графике позволило выявить закономерности практически любых сейсмических воздействий [4]. Обработано большое количество записей акселерограмм землетрясений, что позволило построить

огибающие и осредненные спектры максимальных реакций. Примеры пяти спектров различных землетрясений, среднего спектра (кривая красного цвета) и огибающего спектра (белая линия) представлены на рис. 14.

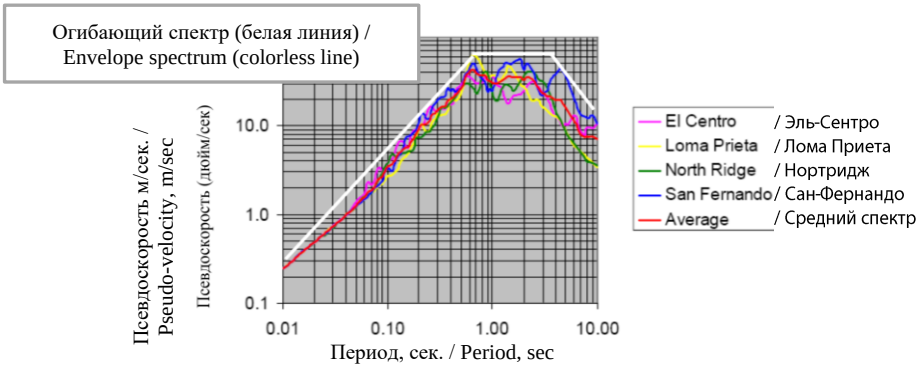

Рис. 14. Примеры комбинированных спектров D-V-A четырех землетрясений, среднего спектра (красная линия) и огибающего спектра (белая линия)
И с т о ч н и к : выполнено Е.Н. Курбацким
Figure 14. Examples of combined D-V-A spectra of four earthquakes, the average spectrum (red line) and the envelope spectrum (white line)
S o u r c e : compiled by E.N. Kurbatskiy

5. Использование представления спектров максимальных реакций в виде трехординатного графика для построения расчетных спектров ответов в нормативных документах

Представление спектров максимальных реакций в виде трехординатного графика позволяет выделить области спектров, которые можно аппроксимировать отрезками прямых, и выделить характерные точки. На рис. 15 представлен пример спектра с указанием характерных областей и точек из работ [4; 6] Это свойство используется для построения расчетных спектров.

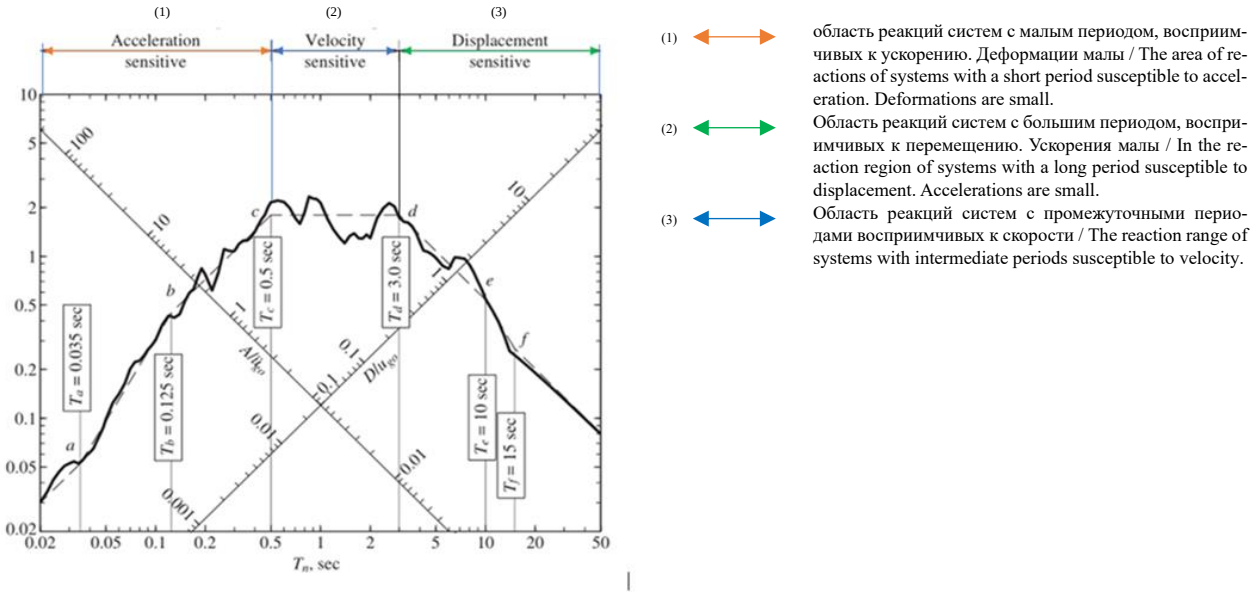

Рис. 15. Спектр реакций на землетрясение с обозначением характерных точек и соответствующих им периодов
И с т о ч н и к : Курбацкий Е.Н. и др. [8]
Figure 15. Earthquake response spectrum with characteristic points and corresponding periods
S o u r c e : Kurbatskiy E.N. et al. [8]

В настоящее время в мире разработаны методики построения расчетных спектров, учитывающих локальные инженерно-геологические условия. В наиболее часто используемой методике, разработанной Ньюмарком и Холлом, в качестве исходных параметров применяются максимальные значения перемещений PGD, скоростей PGV и ускорений PGA грунта, которые умножаются на коэффициенты, зависящие от категории грунтов. На рис. 16 представлен спектр Ньюмарка — Холла и спектр, принятый в европейских нормах.

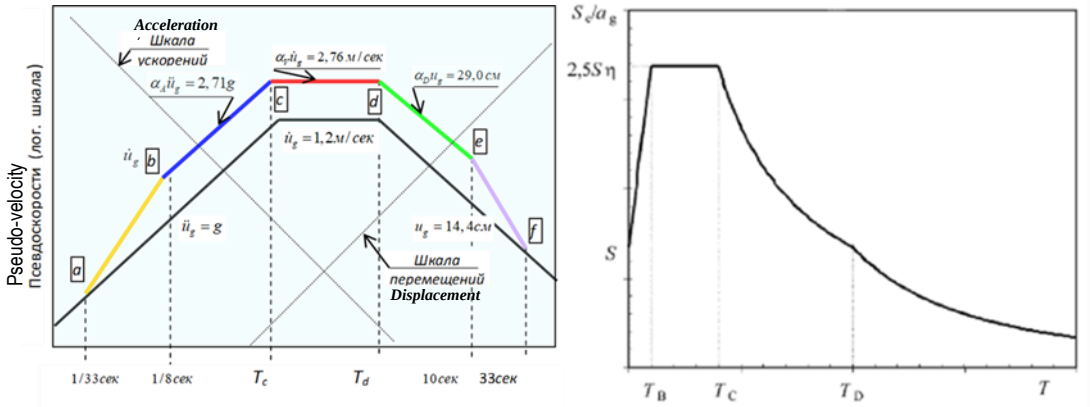

Рис. 16. Спектр Ньюмарка — Холла и EN 1998-1:2004
И с т о ч н и к : Е.Н. Курбацкий [4]
Figure 16. Newmark — Hall and EN 1998-1:2004 spectra
S o u r c e : E.N. Kurbatskiy [4]

Для построения таких спектров необходимо вместо сейсмического районирования в баллах иметь карты сейсмического районирования в изосейсмах ускорений, которые пока, к сожалению, в РФ отсутствуют. В заключение приведем выдержку из статьи известного советского и российского сейсмолога В.И. Уломова, датированной 2012 г.: «И, хотя в отечественной строительной практике до сих пор используется пересчет баллов в ускорения по шкале МСК-64, необходимо отметить, что такой пересчет не учитывает спектральный состав сейсмического воздействия и в силу этого должен очень осторожно применяться для инженерных расчетов без должного обоснования».

6. Заключение

При расчете сооружений на сейсмостойкость важную роль играет способ задания исходной сейсмической информации.

Исходная сейсмическая информация в нормах Российской Федерации не соответствует современным достижениям сейсмической инженерии.

Нормативные документы по сейсмостойкости и районированию, разработанные зарубежными специалистами в области сейсмической инженерии, существенно отличаются от российских.

В отличие от российских международные стандарты, как правило, содержат математические модели и расчетные схемы, разработанные специалистами в области механики сплошных сред и инженерами-строителями, что позволило приблизить сейсмическое районирование и содержание норм к нуждам сейсмостойкого строительства, а также к снижению сейсмического риска.

Выводы

1. В нормах на сейсмостойкость следует отказаться от концепции динамических коэффициентов, не имеющей физического смысла для землетрясений.

2. Разработать концепцию спектров максимальных реакций на землетрясения, учитывая зарубежный опыт.

3. Построение комбинированных спектров ответов D-V-A в логарифмических координат позволит определить характерные точки спектров реакций.

4. Информация о характерных точках спектров максимальных реакций даст возможность построить карты сейсмического районирования РФ в изосейсмах ускорений.

5. Карты в изосейсмах ускорений позволят отказаться от грубого и неточного районирования в баллах, которое нигде в мире не используется.

Список литературы

1. *Suyehiro K.* A seismic vibration analyser and the records obtained therewith // Bulletin of the Earthquake Research Institute-University of Tokyo. 1926. Vol. 1. P. 59–64.

2. *Biot V.A* Theory of vibration of building during earthquakes // Zeitschrift fur Angewandte Matematic und Mechanik. 1934. Vol. 14. Issue 4. P. 213–233.

3. *Hudson D.E.* Response spectrum techniques in engineering seismology // Proceedings of the First World Conference on Earthquake Engineering. Berkley, CA, 1956.

4. *Курбацкий Е.Н.* Спектры Фурье и спектры ответов на землетрясения. М.: EACA (Eurasian SEISMO Association): АНО «СРОСЭКСПЕРТИЗА»: «Onebook.ru», 2018. 156 с.

5. *Chopra A.K.* Elastic response spectrum: a historical note // Earthquake engineering and structural dynamics. 2007. Vol. 36. P. 3–12.

6. Veletsos A.S., Newmark N.M. Response Spectra for Single-Degree of freedom Elastic and Inelastic Systems // Report No. RTD-TRD-63-3096 Vol. III Air Force Weapon Laboratory Albuquerque. N.M. June 1964. URL: https://archive.org/details/DTIC_AD0444989/page/n3/mode/2up?view=theater

7. *Chopra A.K.* Dynamic of Structures. Theory and application to Earthquake Engineering. Englewood Cliffs, N.J.: Prentice-Hall Publ., 1995. 793 p. ISBN: 0-13-855214-2

8. *Курбацкий Е.Н., Мондрус В.Л., Титов Е.Ю., Емельянова Г.А., Пестрякова Е.А.* Устаревшие положения норм Российской Федерации, регламентирующие строительство в сейсмических районах // Academia. Архитектура и строительство. 2024. № 1. С. 159–165. https://doi.org/10.22337/2077-9038-2024-1-159-165

References

1. Suyehiro K. A seismic vibration analyser and the records obtained therewith. *Bulletin of the Earthquake Research Institute-University of Tokyo.* 1926;1:59–64.

2. Biot V.A Theory of vibration of building during earthquakes. *Zeitschrift fur Angewandte Matematic und Mechanik.* 1934;14(4):213–233.

3. Hudson D.E. Response spectrum techniques in engineering seismology. *Proceedings of the First World Conference on Earthquake Engineering*. Berkley, CA, 1956.

4. Chopra A.K. Elastic response spectrum: a historical note. *Earthquake engineering and structural dynamics.* 2007; 36:3–12.

5. Kurbatskiy E.N. *Fourier spectra and earthquake response spectra.* Moscow: EASA (Eurasian SEISMO Association): ANO “SROSEKSPERTIZA”: “Onebook.ru”; 2018.

6. Veletsos A.S., Newmark N.M. Response Spectra for Single-Degree of freedom Elastic and Inelastic Systems. *Report No. RTD-TRD-63-3096 Vol. III Air Force Weapon Laboratory Albuquerque. N.M.* 1964. URL: https://archive.org/details/DTIC_AD0444989/page/n3/mode/2up?view=theater

7. Chopra A.K. *Dynamic of Structures. Theory and application to Earthquake Engineering.* Englewood Cliffs, N.J.: Prentice-Hall Publ.; 1995. ISBN: 0-13-855214-2

8. Kurbatskiy E.N., Mondrus V.L., Titov E.Yu., Emel’yanova G.A., Pestryakova E.A Outdated Provisions of the Russian Federation Norms Regulating Construction in Seismic Areas. *Academia. Architecture and Construction.* 2024;(1): 159–165. https://doi.org/10.22337/2077-9038-2024-1-159-165