



Л. Н. СМЕРНОВА

кандидат технических наук, ученый секретарь АО «НИЦ «Строительство»

А. М. УЗДИН

доктор технических наук, профессор кафедры «Прочность материалов и конструкций»,
ФГБОУ ВО Петербургский Государственный Университет Путей Сообщения им. Александра I

С. В. ПРОКОПОВИЧ

аспирант кафедры «Прочность материалов и конструкций», ФГБОУ ВО Петербургский
Государственный Университет Путей Сообщения им. Александра I;
инженер III категории, ООО «УК «Современные Мостовые Технологии»

УДК 624.042.7

УТОЧНЕНИЕ МОДЕЛИ СЕЙСМИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ДЛЯ СТАТИСТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ РАБОТЫ КОНСТРУКЦИЙ

В статье описывается статистический метод с учётом импульса скорости и энергетических характеристик эталонного воздействия. Также приводится пример генерации воздействия, который включает в себя импульсную составляющую.

Ключевые слова: импульс скорости, интенсивность по Ариасу, сейсмическое воздействие, спектральная плотность.

С середины 50-х годов прошлого века в сейсмостойком строительстве начинают применяться статистические методы анализа, включая статистическое моделирование сейсмических колебаний. В качестве модели воздействия используется подход, предложенный В.В. Болотиним [1] и развитый в России в работах М.П. Салганика [2], Я.М. Айзенберга и его учеников [4,5]. При этом воздействие задается функцией спектральной плотности.

$$S_1(\omega) = \frac{\omega_x}{\pi} \cdot \left[\frac{\omega^2 + \omega_x^2 + \omega_0^2}{(\omega^2 - \omega_x^2 - \omega_0^2)^2 + 4 \cdot \omega_x^2 \cdot \omega_0^2} \right] \quad (1)$$

$$S_2(\omega) = \frac{2}{\pi} \cdot \left[\frac{\omega_x^2 \cdot \omega_0^2}{(\omega^2 - \omega_0^2)^2 + 4 \cdot \omega_x^2 \cdot \omega^2} \right] \quad (2)$$

$$S_3(\omega) = \frac{2 \cdot \omega_x}{\pi} \cdot \left[\frac{\omega_x^2 + \omega_0^2}{(\omega^2 - \omega_0^2)^2 + 4 \cdot \omega_x^2 \cdot \omega^2} \right] \quad (3)$$

$$S_4(\omega) = \frac{2}{\pi} \cdot \frac{\omega_x}{\omega_x^2 + \omega_0^2} \cdot \left[\frac{\omega_0^4 + 4 \cdot \omega_x^2 \cdot \omega^2}{(\omega^2 - \omega_x^2 - \omega_0^2)^2 + 4 \cdot \omega_x^2 \cdot \omega^2} \right] \quad (4)$$

При статистическом моделировании спектральная плотность задает амплитуды составляющих спектрального воздействия, а сдвиг фаз считается случайным. В результате можно генерировать сколь угодно много воздействий с заданным спектральным составом (спектральной плотностью). Характерные примеры такого моделирования имеются в работах [4-6].

К сожалению, указанный подход к заданию сейсмического воздействия имеет существенный недостаток. Расчетные модели обеспечивают заданный спектральный состав и амплитуду ускорений сейсмического воздействия. Ранее было отмечено [3], что при этом не обеспечиваются реальные смещения, что в свою очередь затрудняет применение таких моделей для сейсмоизолированных сооружений.

В работах [3,11] имеются предложения по учету в рамках описанной модели фактических смещений при землетрясении. Однако, по-нашему мнению, этого недостаточно. В настоящее время во всем мире осуществля-

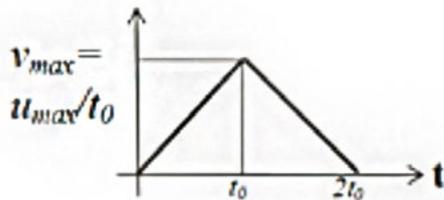


Рисунок 1 — Вид импульса скорости

$$v(t) = \begin{cases} u_{\max} t/t_0^2 & 0 \leq t \leq t_0 \\ \frac{u_{\max}}{t_0} \left(2 - \frac{t}{t_0}\right) & t_0 < t \leq 2t_0 \\ 0 & t > 2t_0 \end{cases} \quad (6)$$

В формуле (6) характеристики импульса скорости зависят от значений u_{\max} и t_0 . Эти два параметра в свою очередь зависят от магнитуды M_w и гипоцентрального расстояния R , и по данным [11] имеют следующий вид:

$$t_0 = 10^{(-3.471 + 0.5 \cdot M_w)}, \quad u_{\max} = 10^{(-6.3 + M_w - \log(R))} \quad (7)$$

Вид импульса скорости показан на рис.1

Импульс скорости сдвинут относительно начала воздействия на величину lag .

Для статистического моделирования импульса скорости в качестве случайных параметров могут рассматриваться три:

- момент включения импульса (lag),
- величина импульса (V_{\max})
- продолжительность импульса ($2t_0$).

В силу соотношений (7) вместо величин V_{\max} и t_0 можно рассматривать более физические величины M_w и R .

В работе авторов [8] отмечается, что импульс скорости можно выделить в любом воздействии. Авторы провели анализ 70 акселерограмм 9-ти балльных воздействий с выделением в них импульса скорости. Гистограмма величины сдвига показана на рис. 2.

Гистограмма хорошо аппроксимируется экспоненциальным законом распределения:

$$f(x) = \lambda \cdot (1 - e^{-\lambda x}) \quad (8)$$

Для имеющихся данных величина λ получается равной $\lambda = 0.128$.

На рис. 3 приведены теоретическая и эмпирическая гистограммы распределения величины сдвига импульса от начала воздействия.

Интенсивность по Ариасу в соответствии с (5) записывается в виде

ется переход к многоуровневому проектированию при расчете упругих систем на действие проектных землетрясений (ПЗ). Пиковые ускорения основания (Peak ground acceleration, PGA) действительно определяют поведение конструкции. Однако, при расчете на максимальное расчетное землетрясение (МРЗ) сейсмостойкость сооружения определяется работой сил пластического деформирования. При этом роль PGA сильно снижается, и определяющими становятся энергетические характеристики воздействия, такие как:

- интенсивность по Ариасу (I_A);
- абсолютная кумулятивная скорость (CAV);
- плотность сейсмической энергии (SED).

Эти показатели вовсе не учитываются в практике статистического моделирования сейсмического воздействия. Уточнить модель воздействия можно на основе предложений авторов [8].

При этом воздействие $\ddot{y}_0(t)$ представляется в виде суммы импульса скорости и стационарного случайного воздействия $\Phi(t)$, умноженного на заданную огибающую

$$\ddot{y}_0(t) = V(t) + \Phi(t) \quad (5)$$

Стационарное воздействие обеспечивает среднее значение PGA. А за счет импульса скорости $V(t)$ можно обеспечить энергетические характеристики воздействия, например, интенсивность по Ариасу, I_A .

Импульс скорости представляется в виде, предложенном итальянскими специалистами [12] и использованном в отечественных работах [8]:

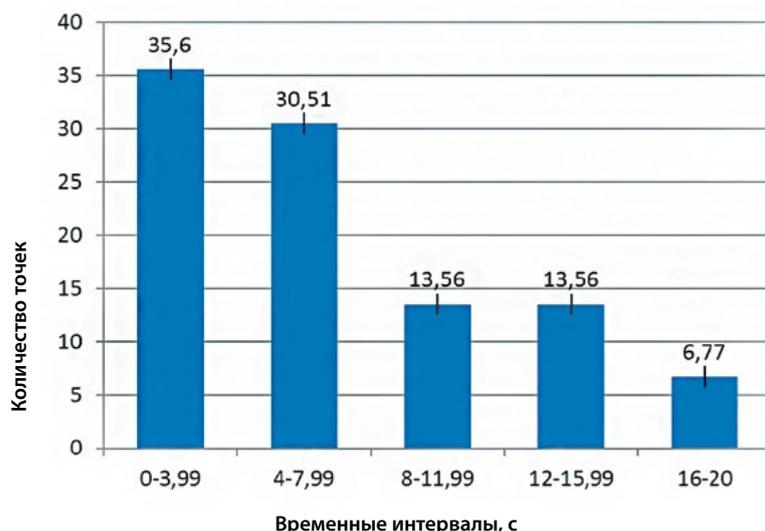


Рисунок 2 — Гистограмма величины сдвига

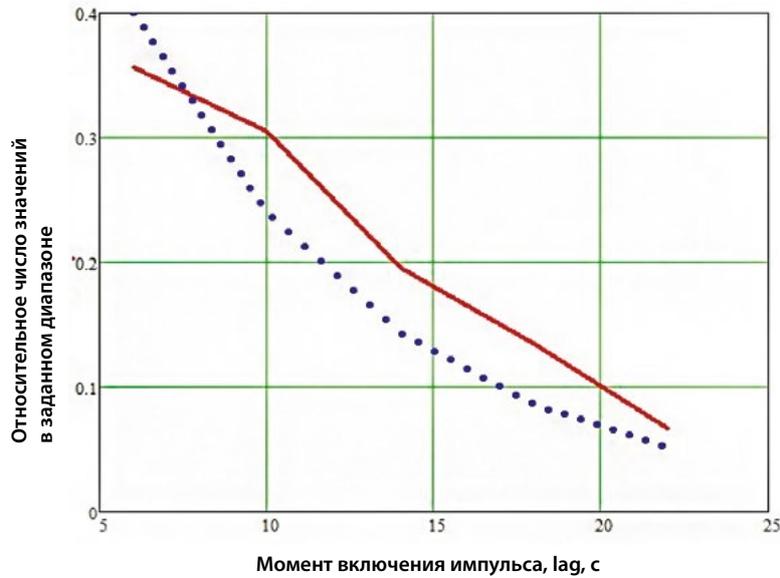


Рисунок 3 — Гистограмма момента включения импульса

— эмпирическая кривая

••••• теоретическая кривая с использованием (8)

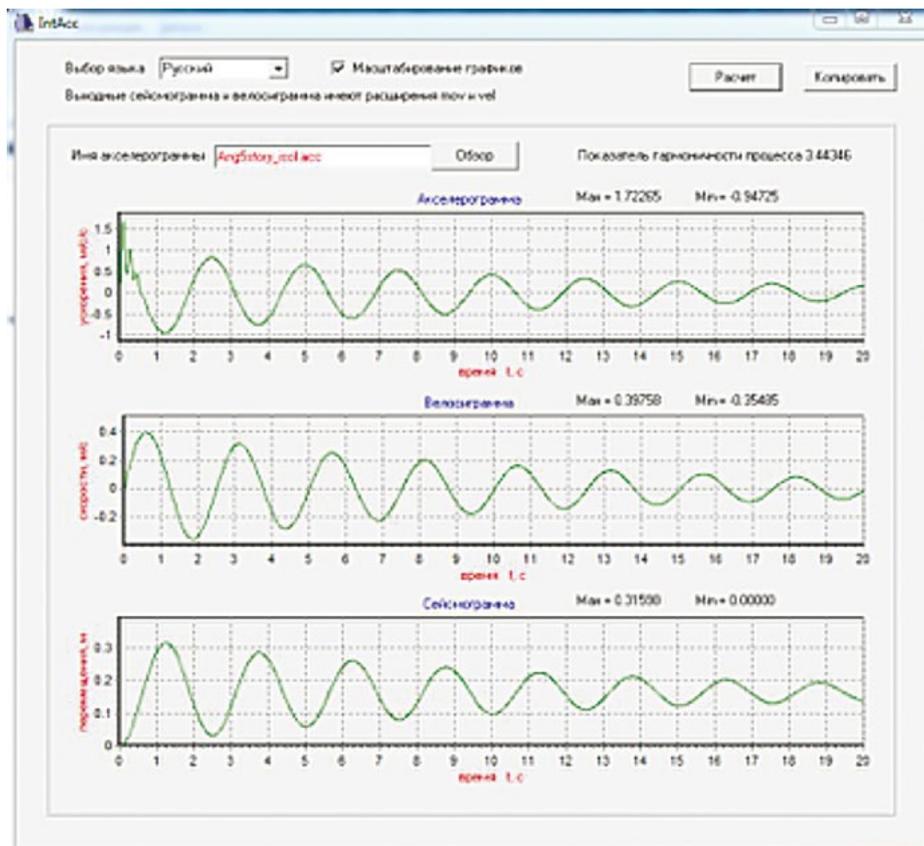


Рисунок 4 — Хронограммы сгенерированного воздействия

$$I_A = \int_0^{\tau} (V + \Phi)^2 dt = \int_0^{\tau} (V)^2 dt + 2 \int_0^{\tau} (V \cdot \Phi) dt + \int_0^{\tau} (\Phi)^2 dt = V_{\max}^2 \cdot t_0 + 2 \int_0^{\tau} (V \cdot \Phi) dt + I_0 \quad (9)$$

В соответствии с [10, 11] интенсивность по Ариасу I_A может считаться случайной величиной, распространенной по закону Вейбулла. Ее также можно выбрать случайным образом. Если пренебречь вторым слагаемым в (9), с учетом того, что в интервале от 0 до τ под интегралом функция Φ знакопеременная, то можно подобрать такое V_{\max} (дельта-функция), которое при умножении на T_0 даст величину равную

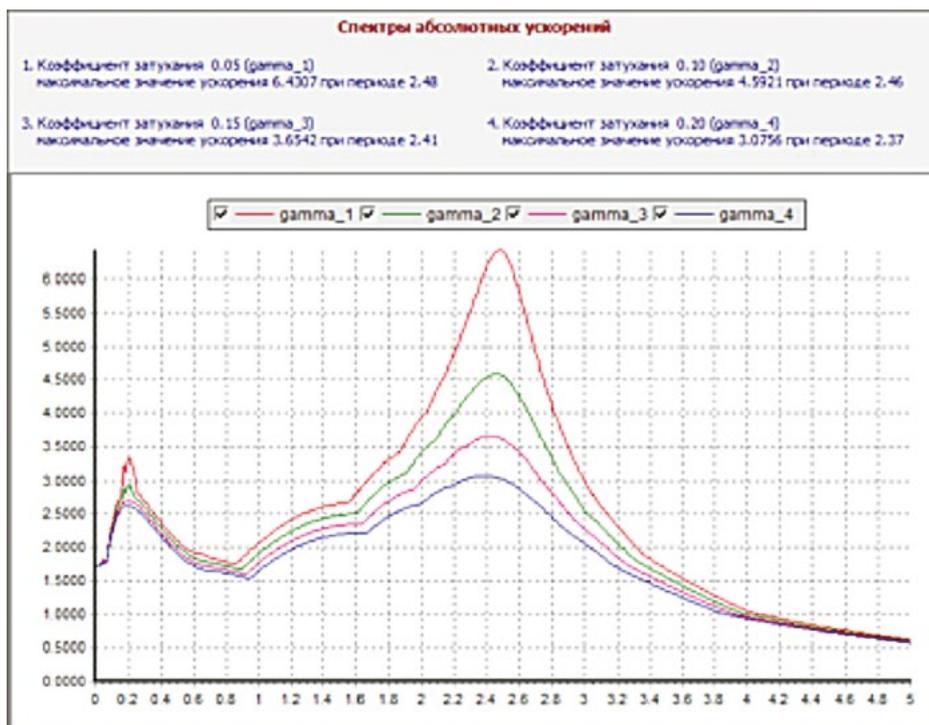


Рисунок 5 — Спектры ускорений

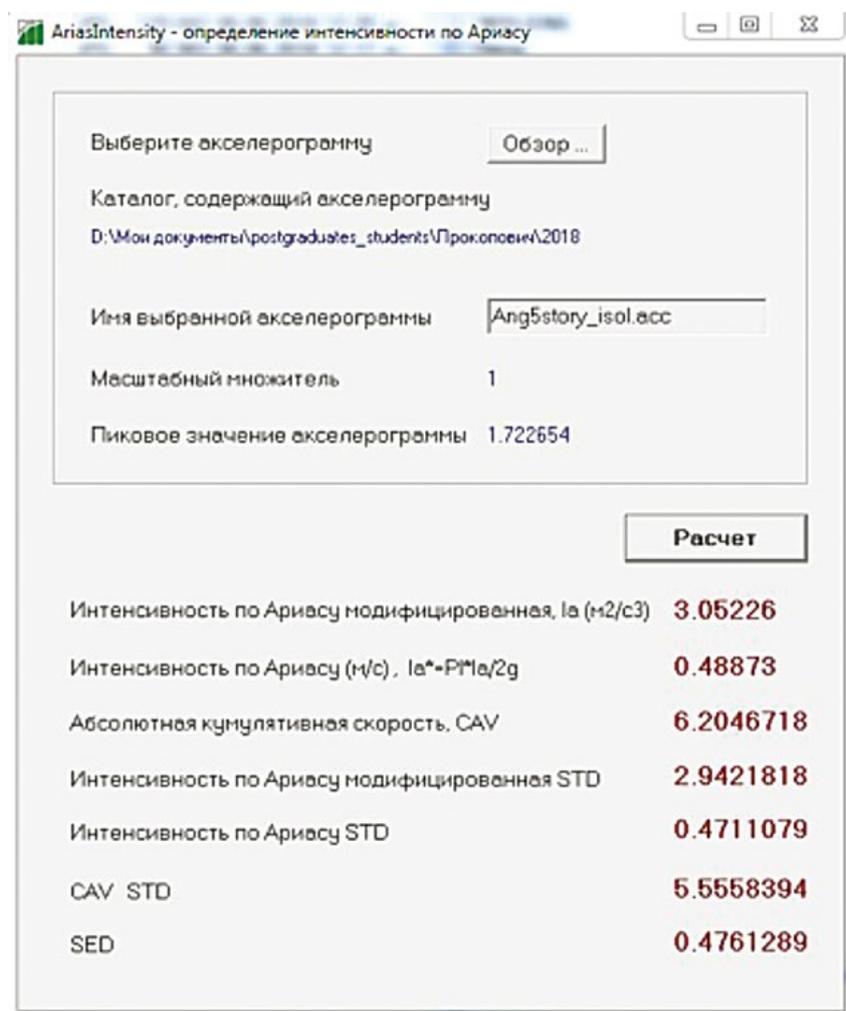


Рисунок 6 — Характеристики сгенерированного сейсмического воздействия

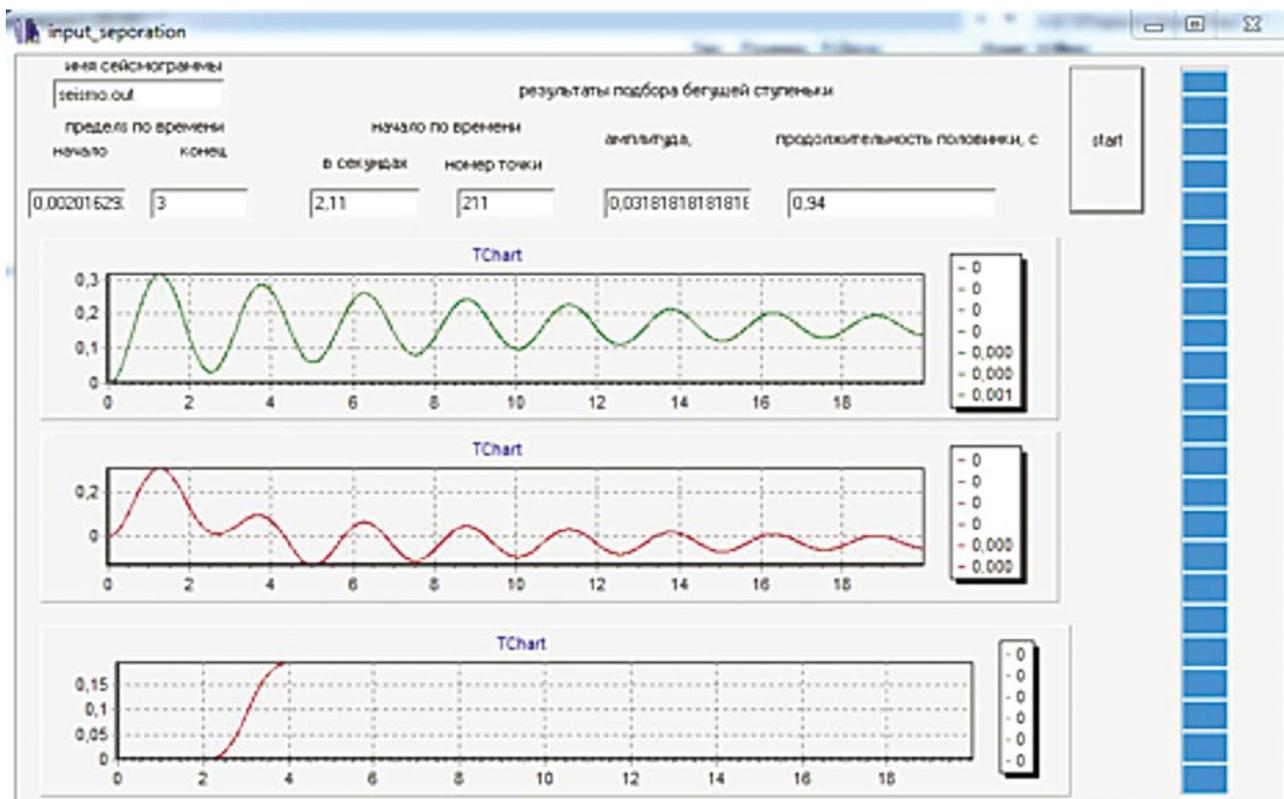


Рисунок 7 — Представление случайного воздействия (верхний рисунок) в виде суммы колебательного процесса (средний рисунок) и импульса скорости (нижний рисунок)

расчетной интенсивности по Ариасу I_{calc} .

Если считать, что R – гипоцентральное расстояние – нормально распределенная величина, известная для рассчитываемого сооружения, то ее также можно выбрать случайным образом. В этом случае продолжительность импульса однозначно определится из формулы для I_{calc} .

$$t_0 = \frac{I_{calc} - I_0}{V_{max}^2} \quad (10)$$

В результате получается статистическая модель воздействия, каждая реализация которой определяется спектральной плотностью на площадке строительства, ожидаемой величиной гипоцентрального расстояния и двумя дополнительными случайными параметрами lag и I_{calc} .

Пример сгенерированного таким образом воздействия приведен на рисунке 4. Акселерограмма сгенерирована для расчета 5-ти этажного сейсмоизолированного здания с преобладающим периодом $T_{eq} = 2.5$ с. На рисунке показаны хронограммы воздействия (акселерограмма, велосигграмма и сейсмограмма).

На рисунке 5 приведены спектры ускорений для полученного воздействия.

На рис.6 приведены характеристики сгенерированного сейсмического воздействия.

На рис.7 показано разделение воздействия. На нем приведены сейсмограммы воздействия и его составляющих в виде колебательного процесса и подъема основания.

В представленной реализации импульс скорости имеет место на интервале от 2.2 до 4 с и приводит к остаточному смещению около 0.2 м.

Заключение.

В соответствии с изложенным в статье предложен метод статистического моделирования сейсмического воздействия в виде суммы случайного колебательного процесса и импульса скорости. Колебательный процесс задается стандартным способом, а импульс скорости определяется тремя случайными параметрами: гипоцентральным расстоянием R , магнитудой воздействия M_w и моментом включения импульса lag . Для величин R и M_w авторы используют нормальное распределение, а для оценки сдвига (запаздывания) импульса скорости – экспоненциальное. Параметры экспоненциального распределения подобраны на основе статистической обработки 70 записей сильных землетрясений.

Литература

1. Болотин В.В. Статистические методы в строительной механике. М.: Изд-во литературы по строительству, 1965. 279 с.
 2. Салганик М.П. О моделировании сейсмических воздействий на строительные соору-

жения // Вопросы инженерной сейсмологии. Вып.26. М.: Наука, 1967. С.157-153.
 3. Уздин А.М., Елизаров С.В., Белаш Т.А. Сейсмостойкие конструкции транспортных зданий и сооружений. Учебное пособие. ФГОУ «Учебно-методический центр по образованию на же-

лезнодорожном транспорте». М., 2012. 500 с.
 4. Айзенберг Я.М., Залилов К.Ю. Генерирование расчетного ансамбля синтетических акселерограмм и исследование влияния их параметров на сейсмическую реакцию сооружения //Расчет и проектирование зда-

ний для сейсмоопасных районов. М.: Наука, 1988. С.5-14.

5. Абакаров А.Д. Исследование оптимальных параметров системы сейсмозащиты с выключаемыми связями и ограничителем перемещений по критерию надежности на ЭВМ методом Монте-Карло // Расчет и проектирование зданий для сейсмостойких районов. М.: Наука, 1988. С.108-114.

6. Давыдова Г.В., Огнева С.В., Уздин А.М., Федорова М.Ю. Генерация расчетных акселерограмм для оценки сейсмического риска // Природные и техногенные риски. Безопасность сооружений. 2011. №4. С.42-47.

7. Белах Т.А., Уздин А.М. Железнодорожные здания для районов с особыми природно-климатическими условиями и техногенными воздействиями. ГОУ «Учеб-

но-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте». М., 2007. 372 с.

8. Uzdin A.M., Dmitrovskaya L.N., Sakharov O.A. Setting the Level of Design Acceleration on the Basis of the Energy Theory Earthquake Engineering. 14-th European Conference on Earthquake Engineering (Ochrid, Macedonia) 30.08.2010-03.09.2010

9. Долгая А.А., Индейкин А.В. Статистический анализ интенсивности по Ариасу и скорости для реальных землетрясений // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2002. № 2. С.32-33.

10. Рекомендации по заданию сейсмических воздействий для расчета зданий разной степени ответственности. СПб – Петропавловск-Камчатский: КамЦентр, 1996. 12 с.

11. Белах Т.А., Сахаров О.А., Давыдова Г.В. Модель сейсмического воздействия для статистического моделирования колебаний сейсмоизолированных систем // Строительство. Известия ВУЗов: Научно-теоретический журнал / Министерство общественного и профессионального образования РФ; Ассоциация строительных вузов СНГ. Новосибирск: Новосибирский Гос. архитектурно-строительный университет, 2009. N2. С. 101-107.

12. Faccioli E., Paolucci R., Rey Ju. Displacement spectra for long periods // Earthquake Spectra, Vol.20, No.2, p.347-376.

Материалы хранятся по адресу:
109428, Москва, ул. 2-я Институтская, 6, стр. 37
109456, а/я 29, г. Москва,
Тел./факс: (499) 174-75-82

SMIRNOVA L., candidate of technical sciences, JSC Research Center of Construction, UZDIN A., doctor of technical Sciences, Professor, Department "Strength of materials and structures", FGBOU to St. Petersburg state University of railway engineering. Alexander I, PROKOPOVICH S., engineer, Department "Strength of materials and structures", FGBOU to St. Petersburg state University of railway engineering. Alexander I

THE REFINEMENT OF THE MODEL OF SEISMIC INPUT FOR THE STATISTICAL MODELING OF STRUCTURES

Abstract

The paper describes a statistical method taking into account the velocity pulse and the energy characteristics of the reference impact. An example of generation

of an impact is also given, which includes the impulse component.

Keywords: velocity pulse, Arias intensity, seismic action, spectral density.

References

1. Bolotin V.V. Statisticheskie metody v stroitel'noy mekhanike [Statistical methods in structural mechanics. M.: Izd-vo literatury po stroitel'stvu, 1965. 279 p. (In Russian).
2. Salganik, M. P. O modelirovanii seismicheskikh vozddeystvii na stroitel'nye sooruzheniia [On the modeling of seismic effects on building structures] // *Voprosy inzhenernoi seismologii* [Questions of engineering seismology]. Vol.2B. M.: Nauka, 1967, p. 157-153 (In Russian).
3. Uzdin A. M., Elizarov S. V., Belash T. A. Seismostoikiie konstruksii transportnyh zdaniia i sooruzhenii [Earthquake resistant design of transport buildings and structures]. Uchebnoe posobie. FGOU "Uchebno-metodicheskii tsentr po obrazovaniuu na zheleznodorozhnom transporte". M., 2012. 500 p. (In Russian).
4. Eisenberg J. M., Zalilov K. Yu. Generirovanie raschetnogo ansambliia sinteticheskikh akselerogramm i issledovanie vliianiia ih parametrov na seismicheskuiu reaktsiuu sooruzheniia [The Generation of a design ensemble of synthetic

accelerograms and the study of the influence of their parameters on the seismic response of the structure] // *Raschet i proektirovanie zdaniia dlia seismoopasnyh raionov* [Calculation and design of buildings for seismic areas]. M.: Nauka, 1988. P. 5-14. (In Russian).
5. Abakarov A.D. Issledovanie optimal'nyh parametrov sistemy seismozashchity s vykliuchaiushchimisia sviaziami i ogranichitelem peremeshchenii po kriteriiu nadezhnosti na EVM metodom Monte-Karlo [Study of optimal parameters of seismic protection system with switching links and a limiter of movements by the criterion of reliability on a computer by the Monte Carlo method] // *Raschet i proektirovanie zdaniia dlia seismostoikich raionov* [Calculation and design of buildings for earthquake-resistant areas]. M.: Nauka, 1988. P. 108-114. (In Russian).
6. Davydova G. V., Oгнева S. V., Uzdin A. M., Fedorov M. Yu. Generatsiia raschetnyh akselerogramm dlia otsenki seismicheskogo riska [Generation of calculated accelerograms for seismic risk assessment]. *Prirodnye i tehnogen-*

nye riski. Bezopasnost' sooruzhenii [Natural and man-made risks. Safety of structures]. 2011. № 4. P.42-47. (In Russian).
7. Belash T.A., Uzdin A.M. Zheleznodorozhnye zdaniia dlia raionov s osobymi prirodno-klimaticheskimi usloviiami i tehnogennymi vozddeistviiami [Railway buildings for areas with special climatic conditions and technogenic input]. GOU "Uchebno-metodicheskii tsentr po obrazovaniuu na zheleznodorozhnom transporte". M., 2007. 372 p. (In Russian).
8. Uzdin A.M., Dmitrovskaya L.N., Sakharov O.A. Setting the Level of Design Acceleration on the Basis of the Energy Theory Earthquake Engineering. 14-th European Conference on Earthquake Engineering (Ochrid, Macedonia) 30.08.2010-03.09.2010
9. Dolgaia A.A., Indeikin A.V. Statisticheskii analiz intensivnosti po Ariasu i skorosti dlia real'nyh zemletriasenii [Statistical analysis of arias intensity and velocity for real earthquakes] // *Seismostoikoe stroitel'stvo. Bezopasnost' sooruzhenii* [Earthquake engineering. Constructions safety]. 2002. № 2. P. 32-33.

(In Russian).

10. Rekomendatsii po zadaniu seismicheskikh vozdeistvii dlia rascheta zdanii raznoi stepeni otvetstvennosti [Recommendations on the task of seismic effects for the calculation of buildings of different degrees of responsibility]. St. Petersburg – Petropavlovsk-Kamchat-sky: Kamcentr, 1996. 12 p. (In Russian).

11. Belash T.A., Saharov O.A., Davydova G. V. Model' seismicheskogo vozdeistviia dlia statisticheskogo modelirovaniia kolebaniy seismoizolirovannykh system [Seismic impact Model for statistical modeling of seismic systems oscillations] // *Stroitel'stvo. Izvestiia VUZov: Nauchno-teoreticheskii zhurnal/Ministerstvo obshchestvennogo i*

professional'nogo obrazovaniia RF; Assotsiatsiia stroitel'nykh VUZov SNG. Novosibirsk: Novosibirskii Gos. Arhitekturno-stroitel'nyi universitet, 2009. N2. P. 101-107. (In Russian).

12. Faccioli E., Paolucci R., Rey Ju. Displacement spectra for long periods // *Earthquake Spectra*, Vol.20, No.2, p.347-376.

Для цитирования: Смирнова Л.Н., Уздин А.М., Прокопович С.В. Уточнение модели сейсмического воздействия для статистического моделирования работы конструкций//Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2018. № 3. С. 24-30.

For citation: Smirnova L.N., Uzdin A.M., Prokopovich S.V. The refinement of the model of seismic input for the statistical modeling of structures // *Seismostoiokoe stroitel'stvo. Bezopasnost' sooruzhenii* [Earthquake engineering. Constructions safety], 2018, no. 3, pp. 24-30. (In Russian).

ПРАВИЛА ОФОРМЛЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ПУБЛИКАЦИИ В ЖУРНАЛЕ «СЕЙСМОСТОЙКОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО. БЕЗОПАСНОСТЬ СООРУЖЕНИЙ»

Текст:

1. **Объем статьи** не должен превышать **40 000** знаков.
2. **Количество авторов** статьи – не более 3-х.
3. **Сведения об авторе** должны содержать: ФИО, регалии, место работы и должность, почтовый и электронный адреса, контактный телефон **на русском и английском языках**. Необходима фотография в формате TIF, JPG.
4. **Ключевые слова** к статье* должны быть **на русском и английском языках**.
5. **Аннотация** к статье должна содержать 100–250 слов **на русском и английском языках**. Аннотация на английском языке не должна полностью повторять текст аннотации на русском языке. Статья должна содержать: введение, цели задачи, методы, результаты, заключение.
6. Обязательно наличие **библиографического списка** с ссылками по тексту на русском (ГОСТ Р7.0.5–2008) и английском языках (или латиницей по правилам Scopus).
7. Обязательное приложение – **рекомендательное письмо** от организации, которую представляет автор, **рецензия** или **экспертное заключение** (для аспирантов или соискателей ученой степени кандидата наук).

Иллюстрации:

1. **Рисунки** должны быть представлены отдельно в форматах файлов (под PC): **PDF, EPS, AI, CDR**;
2. **Фото** должны быть представлены для публикации в форматах файлов (под PC): **TIFF, JPG**;
3. **Разрешение** файлов – не менее **300 dpi**;
4. **Таблицы, схемы и диаграммы** должны быть встроены в статью и иметь связи (быть доступными для редактирования) с программой, в которой они созданы (**Excel**);
5. Обязательно наличие **подписей к иллюстрациям**, оформленных отдельным списком.
6. **Данные в таблицах** даются полностью **без сокращений**.
7. **Математические формулы и выражения** должны быть записаны в **Microsoft Word** или с помощью редактора **Microsoft Equation 3.0**.
8. **УДК статьи**.

Ждем ваши материалы по адресу:
109456, а/я 29, г. Москва
 или по e-mail: **info@raee.su**,
 т/ф.: **(499) 174–70–65**