УДК 624.042.8:69.0

DOI 10.37153/2618-9283-2022-6-8-17

Теоретические и экспериментальные исследования

Спектры энергии и мощности как критерии интенсивности техногенных, динамических и сейсмических воздействий

Минасян А.А.[1], Шуклина М.Л.[2], Ставницер Л.Р.[3]
[1,2,3] АО «НИЦ «Строительство». Москва, Российская Федерация

Аннотация: Рассматриваются спектры мощности и энергии как дополнительные критерии интенсивности техногенных, динамических и сейсмических воздействий. В процессе анализа последствий ряда разрушительных землетрясений было выявлено, что интенсивность сейсмических воздействий, кроме ускорения грунта, непосредственно зависит от спектральных характеристик мощности и энергии внешних воздействий. При расчете и проектировании динамически живучих систем необходимо кроме спектра ускорения учитывать спектры мощности и энергии.

Ключевые слова: сейсмические воздействия, ускорение грунта, энергия, землетрясение, спектры мощности

Для цитирования: Минасян А.А., Шуклина М.Л., Ставницер Л.Р. Спектры энергии и мощности как критерии интенсивности техногенных, динамических и сейсмических воздействий // *Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений*. 2022. № 6. С. 8–17. DOI: 10.37153/2618-9283-2022-6-8-17

Theoretical and experimental studies

Power and energy spectra as criteria for the intensity of technogenic, dynamic and seismic impacts

Minasian A.A.[1], Shuklina M.L.[2], Stavnitser L.R.[3]
[1,2,3] JSC RCC. Moscow, Russian Federation

Abstract: Power and energy spectra are considered as additional criteria for the intensity of technogenic, dynamic and seismic impacts. Analyzing the consequences of a number of destructive earthquakes, it was revealed that the intensity of seismic impacts, in addition to ground acceleration, directly depends on the spectral characteristics of the energy and power of external influences. When calculating the design of dynamically tenacious systems, it is necessary to take into account the power and energy spectra in addition to the acceleration spectrum.

Keywords: seismic impacts, ground acceleration, energy, earthquake, power spectra

@ Минасян А.А., Шуклина М.Л., Ставницер Л.Р., 2022

For citation: Minasian A.A., Shuklina M.L., Stavnitser L.R. Power and energy spectra as criteria for the intensity of technogenic, dynamic and seismic impacts. *Earthquake engineering. Constructions safety.* 2022; no. 6, pp. 8–17 (In Russian)
DOI: 10.37538/2618-92[illegible]2-6-8-17

УСКОРЕНИЯ КАК КРИТЕРИИ ИНТЕНСИВНОСТИ ВНЕШНЕГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

Методы расчета строительных конструкций основаны на динамических принципах определения сейсмических воздействий. Исходными в расчете являются инерционные силы. Последние же связаны с ускорениями грунта, на котором расположено сооружение. Таким образом, ускорения грунта оказываются весьма важной характеристикой, которую сейсмологи давно начали определять. Так, например, максимальные ускорения при землетрясении в Японии в 1923 г. были установлены расчетным путем и по записям приборов. В эпицентральной области они получились равными 200-400 см/с^2, что по данным сейсмолога Б. Гутенберга (США), согласуется с эффектом 10-11 балльного землетрясения. За меру интенсивности сейсмических воздействий принято считать балльность – величину ускорения колебания на свободной поверхности грунта. Это обусловлено тем, что сейсмическая сила непосредственно зависит от ускорения основания [1-4].

В [4] различным баллам соответствовали следующие максимальные ускорения $ÿ_0$ поверхности Земли (табл. 1):

Таблица 1

Table 1

Балл	4	6	8	10	12
$ÿ_0/g$	0,001	0,00[illegible]	0,025	0,1	0,5-1

где g – ускорение силы тяжести.

Японским сейсмологом К. Сюэхиро [5] была опубликована книга, в которой он на основании анализа последствий землетрясений в Токио в1923 г. полагал разумным рассчитывать сооружения на ускорения 0,1 – 0,15 g.

В работе проф. С.В. Полякова подробно анализируются нормируемые ускорения грунта, начиная с 1932 до 1973 г. [6].

В 1957 г. в СССР был изменен метод расчета сейсмических нагрузок. В нормах СН 8–57 для зданий с жесткой конструктивной схемой были существенно повышены сейсмические нагрузки, что вызвало ряд возражений. Авторы возражений настаивали на снижении нагрузок для жестких зданий по сравнению с нагрузками, принятыми в СН 8–57, примерно в 1,5 раза. В то же время в работах Института физики Земли указывалось на значительное занижение принятых в действовавшей с 1932 по 1952 г. шкалы ОСТ 7КС-4537 ускорений грунта $ÿ_{01}$, и были опубликованы значения ускорений $ÿ_0$, полученные по инструментальным данным.

В 1973 г. комиссией, работавшей под председательством акад. А.Г. Назарова по составлению нового варианта шкалы, было предложено дальнейшее увеличение нормируемых ускорений грунта $ÿ_{0н}$ (таблица 2).

Таблица 2

Table 2

Балл	$\ddot{y}_{0н}$, см/с	$\ddot{y}_0$, см/с^2	$\ddot{y}_{0н}$, см/с^2
7	0,01–0,025	0,05–0,1	0,06–0,125
8	0,025–0,05	0,1–0,2	0,125–0,25
9	0,05–0,1	0,2–0,4	0,25–0,5

С 1952 по 1973 г. ускорения грунта, нормируемые шкалой, были скорректированы несколько раз. Вместе с тем с столь большой погрешности, допущенной в оценке ускорений, можно было бы ожидать массовых обрушений сооружений при землетрясениях. Анализ последствий разрушительных землетрясений в Чили (2010 г.), на Гаити (2010 г.), в Новой Зеландии (2011 г.) и др. показывает, что во многих случаях в результате сейсмических воздействий с максимальным ускорением разрушение зданий и сооружений существенно меньше. К такому же выводу пришли специалисты при анализе последствий разрушительных землетрясений. Очевидно, что весьма важной причиной является и то, что в основу шкалы положено максимальное ускорение в пределах всей записи, характерное обычно только для одного цикла, во многих случаях не определяющее работу, энергию и мощность сейсмических воздействий.

Здания и сооружения, спроектированные и рассчитанные по нормам на сейсмические воздействия, могут выдержать лишь некоторую долю инерционной нагрузки (например, по СП для 8-балльной зоны эта доля составляет 25–40%). При этом в зданиях могут развиваться неупругие деформации, трещины, повреждения некоторых внутренних связей. Однако при землетрясениях здание должно выдерживать мощность многократно повторяющихся сейсмических воздействий, сопровождающихся толчками и ударами разных направлений [7–9].

На рис 1. показано разрушение зданий при землетрясении в Индонезии.



Рисунок 1 – Разрушение зданий при землетрясении в Индонезии (2021 г.)

Figure 1 – Разрушение зданий при землетрясении в Индонезии (2021 г.)

КРИТЕРИИ ПО СПЕКТРУ МОЩНОСТИ И ЭНЕРГИИ

Рассмотрим возможность применения спектральных параметров мощности в качестве меры интенсивности сейсмических воздействий.

Рассмотрим колебания сооружения, которое моделируем как систему с *n*-й степенью свободы.

Дифференциальное уравнение движения имеет следующий вид:

$$\frac{d^2Q(\tau)}{d\tau^2}+\varpi_k^2\exp(i\alpha)Q(\tau)=\sigma_k\frac{d^2Q_0(\tau)}{d\tau^2} \qquad (1)$$

Здесь $Q(\tau)$ - обобщённый вектор смещения; ϖ_k - частота колебаний *к*-ой формы; α - мера рассеяния энергии (затухания); $Q_0(\tau)$ - характеристика движения почвы:

$$\delta_{ЛО}=\frac{\int_0^l \phi_k(x)M(x)dx+\sum_{i=1}^{N}\phi_{ik}M_i}{\int_0^l \phi_k^2(x)Mxdx+\sum_{i=1}^{N}\phi_{ik}^2M_i}$$

где M_i — инерционная характеристика, $\phi_k(x)$ - характеристика собственной функции.

Для простоты мы рассматриваем сейсмические воздействия на систему с единичным весом:

$$Q(\tau)=-\delta(2\pi)^{-1}T\int_0^{\tau}Q_0(\tau\_)\exp\left[-\frac{\alpha}{2}2\pi T^{-1}(\tau-\tau\_)\right]\sin 2\pi T^{-1}(\tau-\tau\_)d\tau\_$$

где $T=2\pi\Omega^{-1}$

и $\Omega=2\pi\left(\omega^2-\alpha^2/4\right)^{-1/2}$.

Если система имеет лишь один сосредоточенный груз ($\delta=1$), тогда получаем:

$$Q(\tau)=-\delta(-2\pi)^{-1}T\int_0^{\tau}Q_0(\tau\_)\exp\left[-\frac{\alpha}{2}2\pi T^{-1}(\tau-\tau\_)\right]\sin 2\pi T^{-1}(\tau-\tau\_)d\tau\_ \qquad (2)$$

Обозначим спектр скоростей как

$$S_v(T,\alpha)=/-\int_0^{\tau}Q_0(\tau\_)\exp\left[-\frac{\alpha}{2}2\pi T^{-1}(\tau-\tau\_)\right]\sin 2\pi T^{-1}(\tau-\tau\_)d\tau\_/\max \qquad (3)$$

Затем определим:

- спектр смещений $S_Q(T,\alpha)=|Q(\tau)|\max$, записав его следующим образом: (4)

$$S_Q(T,\alpha)=(2\pi)^{-1}TS_v(T,\alpha) \qquad (5)$$

Спектр ускорений определяется:

$$S_a(T,\alpha)=2\pi T^{-1}S_v(T,\alpha)=\left(2\pi T^{-1}\right)^2S_Q(T,\alpha) \qquad (6)$$

Сейсмическая сила будет:

$$S_S(T,\alpha)=g^{-1}S_W(T,\alpha)=g^{-1}2\pi T^{-1}S_v(T,\alpha)=g^{-1}\left(2\pi T^{-1}\right)^2S_Q(T,\alpha) \qquad (7)$$

$S_m(T,\alpha)$ - размерность, сила, масса единицы.

Выразим спектр мощности сейсмического воздействия следующей зависимостью:

$$S_m(T,\alpha)=g^{-1}(2\pi T^{-1})\left\{\left|-\int_0^{\tau}Q_0(\tau\_)\exp\left[-\frac{\alpha}{2}2\pi T^{-1}(\tau-\tau\_)d\tau\_\right]\right|_{\max}\right\}^2 \qquad (8)$$

По спектру смещений спектр мощности примет вид:

$$S_M(T,\alpha)=-g^{-1}(2\pi T^{-1})^3 S_Q^2(T,\alpha) \qquad (9)$$

А по спектру ускорения:

$$S_Э(T,\alpha)=(2\pi)^{-1}TS_m(T,\alpha) \qquad (11)$$

На рис. 2 приведены технические решения по обеспечению живучести безригельных железобетонных зданий.

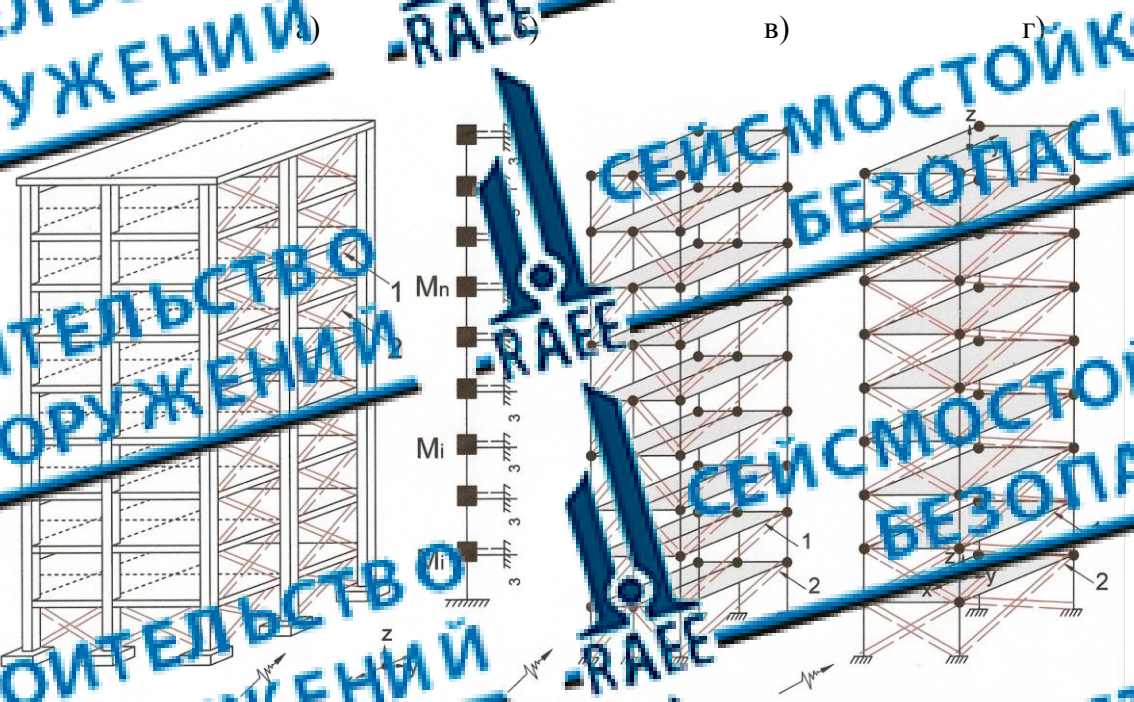

Рисунок 2 – Техническое решение комбинированных живучих систем безригельных зданий.
1 – упругопластические элементы; 2 – хрупко-разрушающиеся элементы;
а – общий вид безригельного здания; б – расчетная схема с сосредоточенными массами на уровне перекрытий; в – расчетные схемы с применением перекрытий типа жестких дисков и треугольных связей в поперечном направлении; г – расчетные схемы с применением перекрытий типа жестких дисков и крестообразных связей в поперечном направлении.

Figure 2 – The technical solution of the combined tenacious systems of beamless buildings.
1 – elastic–plastic elements; 2 - brittle-collapsing elements;
a – a general view of a beamless building; b – a design scheme with concentrated masses at the floor level;
c – design schemes using hard disk type overlaps and triangular connections in the transverse direction;
d – design schemes using hard disk type overlaps and cross-shaped connections in the transverse direction.

Обычно в инженерной практике интенсивность землетрясений оценивается характеристиками смещений, скорости и ускорения. С использованием 53 акселерограмм сильнейших землетрясений мира, были проанализированы их разрушительные способности в зависимости от максимальных параметров колебаний грунта, кинематических спектров, а также спектров мощности и энергии сейсмических воздействий. Обнаружено, что массовые разрушения зданий и сооружений обусловлены спектральными характеристиками мощности и энергии, которые для землетрясений в Скопле 1976 *г.,* Мехико 1986 г., Сан-Франциско Эль-Центро 1940 г., Спитаке 1988 г., в Турции (два) 1999 г., имеют максимальные величины, большие, чем для других землетрясений с равноценными кинематическими параметрами (например, землетрясений Паркфилда, Калифорнийского и др.).

Таблица 3

Table 3

Безразмерные максимальные величины спектра	Спитак Гукасян	Эль-Центро	Паркфилд
работы	6,5	8,8	5,7
мощности	0,81	1,19	0,56
ускорения	0,37	0,53	0,78

В таблице 3 приведен пример анализа спектральных составов землетрясений в Спитаке, Эль-Центро и Паркфилде. Во время землетрясения в Паркфилде параметры максимального ускорения грунта и кинематических спектров были на 50% больше, чем те же параметры землетрясений в Эль-Центро 1940 г. и Спитаке в 1988 г. Однако в Эль-Центро и Спитаке многие здания были повреждены и разрушены значительно больше, чем в Паркфилде. С учетом данных (таблица 3) настоящей работы можно сделать вывод, что спектры мощности и энергии в Эль-Центро и Спитаке были интенсивнее, чем в Паркфилде. Этим и объясняется большее разрушительное воздействие землетрясения Эль-Центро 1940 г.

Живучесть безригельных каркасных зданий может быть обеспечена комбинационными программными элементами, часть из которых может хрупко, скачкообразно разрушаться, а другая – пластически деформироваться.
Пороги разрушения этих элементов значительно ниже, чем безригельных каркасных зданий, что обеспечивает использование полной несущей способности комбинационных элементов (связей, пунков, прядей, вантов). Данные элементы могут устанавливаться между жесткими дисками перекрытия и колоннами, а также крестообразно между несущими колоннами (рис. 2).

Значительный вклад в развитие сейсмозащитных систем в СССР и России внесли профессор Я.М. Айзенберг и его ученики.

Анализ проведенных исследований параметров 53-х землетрясений показывает: интенсивность, работа (энергия) и разрушительная способность сейсмических воздействий адекватно характеризуют спектры мощности и энергии. Таким образом, при проектировании динамически живучих систем необходимо учитывать спектральный состав мощности и энергии внешнего воздействия.

На рис. 3 представлены спектры энергии обычной системы *(а)* и живучей системы *(б)*.



Рисунок 3 – Спектры энергетических характеристик а) ОС – обычная система, б) ЖС – живучая система

Figure 3 – Spectra of energy characteristics a) OS – a conventional system, b) LS – a tenacious system

Спектры энергии живучих систем значительно ниже спектров обычной системы, что дает возможность надежно эксплуатировать здания и сооружения при экстремальных техногенных, динамических и сейсмических воздействиях.

На рис. 4 приведены спектры ускорения при сейсмических воздействиях в г. Акапулько, 1962 г., при затухании 1%, 2% и 5% от критического.

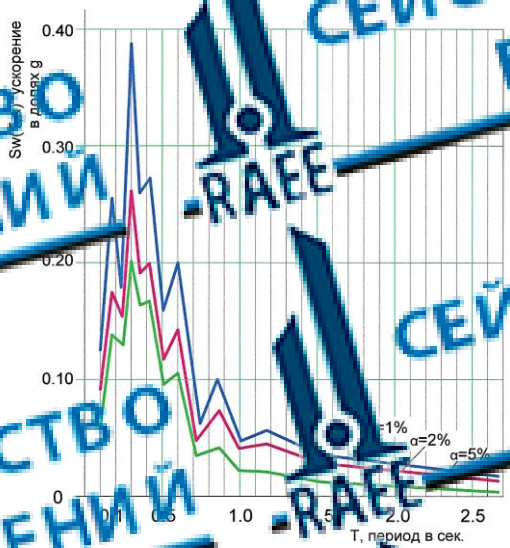

Рисунок 4 – Спектры ускорения при сейсмических воздействиях в г. Акапулько, 1962 г.

Figure 4 – Acceleration spectra under seismic impacts in Acapulco, 1962

На рис. 5 приведены спектры ускорения и энергии при сейсмических воздействиях, г. Акапулько, 1962 г.

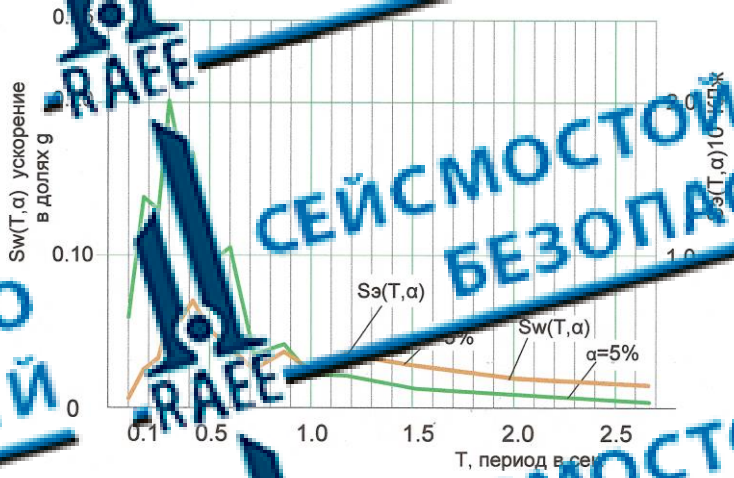

Рисунок 5 – Спектры ускорения и энергии при сейсмических воздействиях, г. Акапулько, 1962 г., затухание 5% от критического

Figure 5 – Acceleration and energy spectra under seismic impacts, Acapulco, 1962, attenuation of 5% of the critical

На рис. 6 приведены спектры ускорения при сейсмических воздействиях в Мехико, 1964 г., при затухании 1%, 2%, 5%.

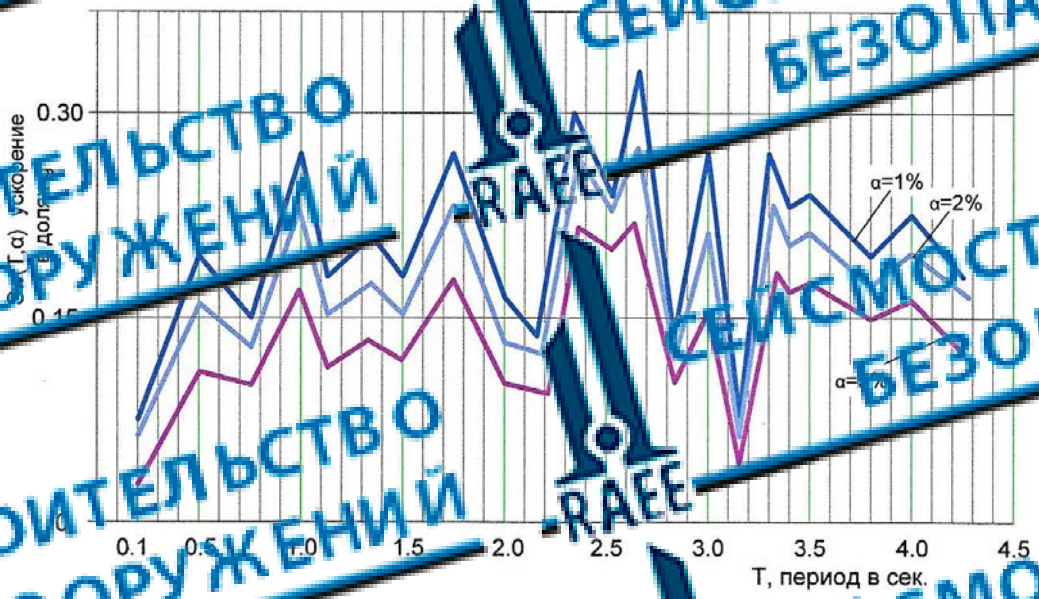

Рисунок 6 – Спектры ускорения при сейсмических воздействиях в Мехико, 1964 г.

Figure 6 – Acceleration spectra under seismic impacts in Mexico City, 1964

На рис. 7 приведены спектры ускорения и энергии при сейсмических воздействиях в Мехико, 1964 г., затухание 5%.

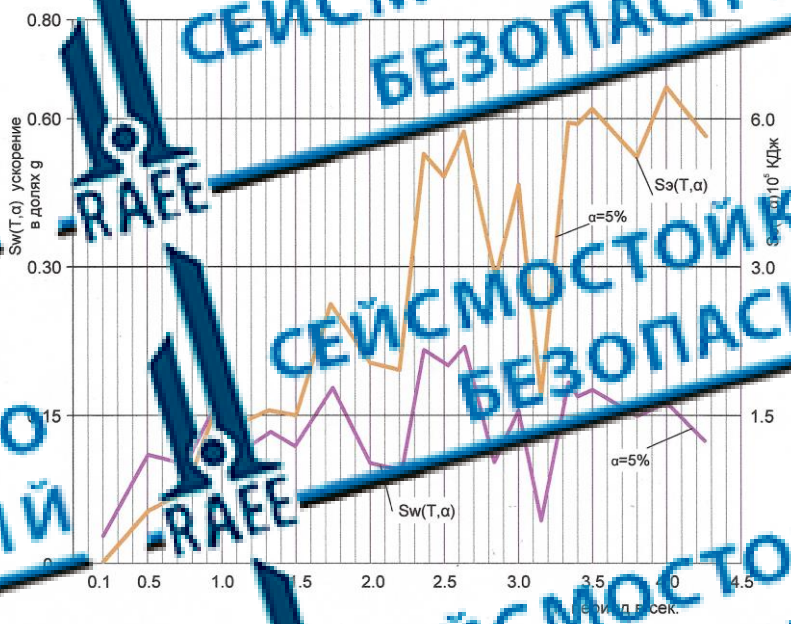

Рисунок 7 – Спектры ускорения и энергии при сейсмических воздействиях в Мехико 1964

Figure 7 – Acceleration and energy spectra under seismic impacts in Mexico City, 1964

Анализ результатов исследования показывает, что интенсивность и разрушительная способность аварийных нагрузок совместно с кинематическими параметрами определяют спектры мощности энергии техногенных, динамических и сейсмических воздействий.

ВЫВОДЫ

Интенсивность техногенных, динамических и сейсмических воздействий может быть охарактеризована кинематическими параметрами колебаний грунта и спектрами мощности и энергии.

Рекомендуется при расчете и проектировании живучих систем (особенно ответственных сооружений) учитывать параметры и спектральные характеристики мощности и энергии, как более адекватные критерии оценки внешних воздействий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Минасян А.В. Комплексное резервирование спектральной живучести уникальных сооружений при чрезвычайных динамических, сейсмических и техногенных воздействиях // *Вестник НИЦ «Строительство»*. 2011. № 3–4. С. 167–171.
2. Айзенберг Я.М., Минасян А.В., Смирнов В.И., Арутюнян А.М. Оценка интенсивности сейсмических воздействий с учетом грунтовых условий на Ленинаканском плато Армении // *Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений*. 2000. № 4. С. 15–17.
3. Назаров А.Г. Методы инженерного анализа сейсмических сил. Ереван: Изд. АН Арм ССР. 1959. 314 с.
4. Гутенберг Б., Рихтер К. Сейсмичность Земли. Пер. с англ. М.: ИЛ. 1948. 178 с.
5. Сюэхиро К. Инженерная сейсмология. Пер. с англ. М.: Экономическая жизнь. 1935. 157 с.
6. Поляков С.В. Последствия сильных землетрясений. М.: Стройиздат. 1978. 310 с.
7. Ганиев Р.Ф., Коненко В.С. Колебания твердых тел. М.: «Наука». 1976. 431 с.

8. Современное состояние теории сейсмостойкости и сейсмостойкие сооружения. Материалы IV международной конференции по сейсмостойкому строительству. М.: Стройиздат. 1973. 280 с.
9. Айзенберг Я.М., Смирнов В.И., Минасян А.В. Неупругие демпфирующие элементы-связи для сейсмозащиты безригельных каркасов // *Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений*. 2001. № 2. С. 38-39.

REFERENCES

1. Minasyan A.V. Kompleksnoe rezervirovanie spektral'noj zhivuchesti unikal'nykh sooruzhenij pri chrezvychajnykh dinamicheskikh, sejsmicheskikh i tekhnogennykh vozdejstviyakh. *Vestnik NIC «Stroitel'stvo»*. 2011, no. 1-4, p. 157–171.[In Russian]
2. Eizenberg J.M., Minasyan A.V., Smirnov V.I., Avetisyan A.M. Otsenka intensivnosti sejsmicheskikh vozdejstvij s uchetom grantovykh uslovij na Leninakanskom plato Armenii. *Sejsmostojkoe stroitel'stvo. Bezopasnost' sooruzhenij*. 2000, no.4, 15–17 p. [In Russian]
3. Nazarov A.G. Metod inzhenernogo analiza sejsmicheskikh sil. Yerevan, Izd. AN Arm. SSR. 1959. 314 p. [In Russian]
4. Gutenberg B., Rikhter K. Sejsmichnost' Zemli. Per. s angl. M. IL. 1948. 118 p. [In Russian]
5. Syuehekhiro K. Inzhenernaya sejsmologiya. Per. s angl. M.: Ehkonomicheskaya zhizn'. 1935. 137 p. [In Russian]
6. Polyakov S.V. Posledstviya sil'nykh zemletryasenij. M.: Strojizdat. 1978. 310 p. [In Russian]
7. Ganiev R.F., Kononenko V.O. Kolebaniya tvordykh tel. M.: «NaukA». 1976. 431 p. [In Russian]
8. Sovremennoe sostoyanie teorii sejsmostojkosti i sejsmostojkie sooruzheniya. Materialy IV mezhdunarodnoj konferencii po sejsmostojkomu stroitel'stvu. M.: Strojizdat. 1973. 280 p. [In Russian]
9. Eizenberg J.M., Smirnov V.I., Minasyan A.V. Neuprugie dempfiruyushchie ehlementy-svyazi dlya sejsmozashchity bezrigel'nykh karkasov. *Sejsmostojkoe stroitel'stvo. Bezopasnost' sooruzhenij*. 2001, no.2, 38–39 p. [In Russian]

Данные об авторах / Information about authors

Минасян Арман Арамаисович, кандидат технических наук, заведующий сектором железобетонных конструкций лаборатории кирпичных, блочных и панельных зданий ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко АО «НИЦ «Строительство», Москва, Российская Федерация 1747210@mail.ru
Arman A. Minasyan, Cand. Sci. (Engineering), head of the Reinforced concrete structures sector of the Laboratory of brick, block and panel buildings of TSNIISK named after V.A. Koucherenko JSC RCC. Moscow, Russian Federation 1747210@mail.ru

Шуклина Марина Львовна, инженер лаборатории кирпичных, блочных и панельных зданий ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко АО «НИЦ «Строительство», Москва, Российская Федерация
Marina L. Shuklina, engineer of the Laboratory of brick, block and panel buildings of TSNIISK named after V.A. Koucherenko JSC RCC. Moscow, Russian Federation

Ставницер Леонид Рувимович, доктор технических наук, профессор, главный специалист НИИОСП им Н.М. Герсеванова АО «НИЦ «Строительство», Москва, Российская Федерация
Leonid R. Stavnitser, Dr. Sci. (Engineering), professor, chief specialist of the NIIOSP named after N.M. Gersevanov of JSC RCC. Moscow, Russian Federation