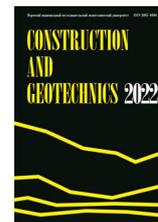




CONSTRUCTION AND GEOTECHNICS

Т. 13, № 1, 2022

<http://vestnik.pstu.ru/arhit/about/inf/>



DOI: 10.15593/2224-9826/2022.1.04

УДК 69.04

ОЦЕНКА СЕЙСМОСТОЙКОСТИ МНОГОЭТАЖНЫХ ЗДАНИЙ ПРИ СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ НА СЛАБЫХ ПРОСАДОЧНЫХ ГРУНТАХ

Х.Р. Зайнулабидова

Дагестанский государственный технический университет, Махачкала, Россия

О СТАТЬЕ

Получена: 21 ноября 2021
Одобрена: 22 января 2022
Принята к публикации:
03 марта 2022

Ключевые слова:

сейсмическая волна, физико-механические свойства грунтов, толщина рыхлого слоя грунта, сейсмическая нагрузка, момент инерции, потеря устойчивости.

АННОТАЦИЯ

Под воздействием динамических и статических нагрузок происходит изменение объёмов слабых грунтов в основании за счёт уменьшения пористости. В связи с этим проведены исследования устойчивости здания при сейсмических воздействиях, основаниями которых являются упругопластические слои. В результате получено уравнение движения грунта для определения общего угла наклона здания с учётом сейсмического воздействия, характерного для строительной площадки, и характеристик самого здания. Показано увеличение риска вследствие потери устойчивости основания за счёт возможного наклона здания. Разобран и обоснован механизм ослабления грунтов, приводящий к опрокидыванию зданий. Показаны параметры, влияющие на кинематические характеристики зданий и сооружений. Определено, что упругая система, состоящая из здания и основания, имеет односторонние связи между фундаментом и основанием, которые удаляются под воздействием сейсмических сил на отдельных участках подошвы фундамента, где статическая нагрузка незначительна. Удаление связей вызывает изменение жёсткости системы. Центр тяжести и центр масс смещаются на некоторое расстояние, следовательно, возникают изменяющиеся колебания. Диапазон колебаний при этом зависит от соотношения собственных частот зданий и сейсмических волн. Известно, что когда здание под действием внешних сил получает некоторый уклон относительно вертикальной оси, то происходит снижение нагрузки. Для определения коэффициента снижения нагрузки получена зависимость. В работе рассмотрено практическое решение задачи на устойчивость на примере 50-метрового здания. Исходя из общих принципов сейсмостойкого строительства при расчёте на опрокидывание, проведены несколько расчётов зданий с применением исходных данных для частых и слабых воздействий, умеренной силы и на редкие сильные воздействия.

Результаты исследований можно применить для расчётов многоэтажных и высотных зданий, строящихся на слабых деформируемых грунтах, наряду с другими расчётами, позволяющими увеличить сейсмостойкость.

© ПНИПУ

© Зайнулабидова Ханзада Рауповна – кандидат технических наук, доцент, e-mail: hanzada1@mail.ru, ORCID: 0000-0002-6073-4538

Khanzada R. Zainulabidova – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, e-mail: hanzada1@mail.ru, ORCID: 0000-0002-6073-4538

ASSESSMENT OF SEISMIC RESISTANCE OF MULTI-STOREY BUILDINGS UNDER SEISMIC IMPACTS ON WEAK SUBSIDENCE SOILS

Kh.R. Zainulabidova

Dagestan State Technical University, Makhachkala, Russian Federation

ARTICLE INFO

Received: 21 November 2021
Approved: 22 January 2022
Accepted for publication:
03 March 2022

Keywords:

seismic wave, physical and mechanical properties of soils, thickness of loose soil layer, seismic load, moment of inertia, loss of stability.

ABSTRACT

Under the influence of dynamic and static loads, the volumes of weak soils in the base change due to a decrease in porosity. In this regard, studies of the stability of the building under seismic influences, the bases of which are elastic-plastic layers, have been carried out. As a result of the research carried out in this paper, an equation of ground motion was obtained to determine the general angle of inclination of the building, taking into account the seismic impact characteristic of the construction site and the characteristics of the building itself. An increase in the risk due to the loss of stability of the base due to the possible slope of the building is shown. The mechanism of soil weakening, which leads to the overturning of buildings, is analyzed and justified. The parameters affecting the kinematic characteristics of buildings and structures are shown. It is determined that an elastic system consisting of a building and a base has one-way connections between the foundation and the base, which are removed under the influence of seismic forces in certain areas of the foundation sole, where the static load is insignificant. Removing the links causes a change in the rigidity of the system. The center of gravity and the center of mass are shifted by a certain distance, therefore, there are changing fluctuations. The range of vibrations in this case depends on the ratio of the natural frequencies of buildings and seismic waves. It is known that when a building under the influence of external forces receives a certain slope relative to the vertical axis, then there is a decrease in the load, a dependence is obtained to determine the load reduction coefficient. The paper considers a practical solution to the problem of stability on the example of a 50-meter building. Based on the general principles of earthquake-resistant construction in the calculation of overturning, several calculations of buildings were carried out using the initial data for frequent and weak impacts, moderate strength and rare strong impacts.

The results of the research can be applied to the calculations of multi-storey and high-rise buildings built on weak deformable soils, along with other calculations that allow increasing seismic resistance.

© PNRPU

Введение

Сильнейшие землетрясения, оказывающие разрушительное воздействие, происходят на земле каждый месяц, иногда чаще раза в месяц. Значительная часть сильных землетрясений приходится на дно морей и океанов, поэтому мы их не всегда ощущаем. Сейсмологами отмечается, что во всем мире происходит активизация глобальной сейсмичности. В последние годы произошли катастрофические землетрясения: в Перу [1], Италии [2; 3], Японии [4], Мехико [5] и др. Увеличение урбанизированных территорий повышает риск проживания людей в сейсмических районах и предъявляет новые требования к обеспечению надежности зданий и сооружений.

Поведение зданий при землетрясениях зависит от многих факторов – параметров самого здания (геометрических размеров в плане, высоты, конструктивного решения и др.), основания (физико-механических качеств грунтов, слагающих основание здания), характеристик очаговой зоны. Задача учёных – комплексно оценить сейсмическую опасность, определить уязвимость тех или иных конструктивных и объёмно-планировочных решений зданий и сооружений. Для многоэтажных и высотных зданий актуален вопрос, связанный с общей устойчивостью при сейсмических воздействиях. В работах Р.Э. Татевосян,

Н.Г. Мокрушиной [6], В.И. Уломова [7], А.Ю. Марченкова, Н.К. Капустян, Б.В. Смирнова [8], А.Г. Тяпина, А.С. Топоркова, В.С. Михайлова [9] рассматривались проблемы устойчивости высотных зданий в крупных мегаполисах. Ещё один очень важный аспект, который не всегда учитывается проектировщиками и не учтён в действующих нормах СП 14.13330, – это возможная внезапная потеря устойчивости здания. В действующих нормативах СП 14.13330 применена концепция упрощения при определении сейсмических нагрузок с учётом нелинейности поведения грунтов. Такой подход является общепринятым, но результаты последних исследований О.В. Мкртычева, Г.А. Джинчвелашвили [10], О.Р. Озмидова [11] показали, что в некоторых случаях возможен дефицит сейсмостойкости. Расчёт зданий в сейсмоопасных районах проводится по методике, основанной на линейно-спектральном подходе. Применяемый метод не позволяет оценить вероятность отклонений расчётных значений от действительных, связанных с нелинейными свойствами грунтов, проявляющихся при динамическом нагружении. Проблема состоит в том, что возможен эффект резонанса, который усиливает сейсмические колебания рыхлых грунтов. Параметры колебаний грунтов зависят от физико-механических характеристик и мощности. В зависимости от этих характеристик колебания одних частотных интервалов усиливаются, а других практически полностью поглощаются. При землетрясении Лома Приета в Калифорнии (1989) с $M = 7,1$ К. Аки, Р.Г. Richards в своей работе [12] показали, что больше всего пострадала территория Сан-Франциско, построенная на морских глинистых отложениях. Записи землетрясений показали, что по сравнению с другими участками амплитуды сейсмических колебаний на этих территориях были больше в 5–6 раз для колебаний с периодами около 6 с и в 2–4 раза с периодами 1,5–2 с.

Собственные же периоды колебаний многих разрушенных 3–4-этажных домов составляли 0,2–0,3 с. При землетрясении 1985 г. с магнитудой $M = 8,1$ в Мехико, расположенном в 300 км от эпицентра, по данным Геологической службы США [13], разрушилась значительная часть города. На отдельных территориях города резонансное усиление сейсмических воздействий с периодами около 2 с, достигло 50 раз, что привело к разрушению 12–20-этажных зданий с близкими резонансными периодами. Приведённые примеры последствий землетрясений требуют от нас исследований в области вынужденных колебаний сооружений на тех или иных грунтах, т.е. определения и учёта при расчётах сооружений таких характеристик грунтов, как модуль деформации, коэффициент затухания, неизоотропность, слоистость и др. Есть ещё один очень важный фактор – изменчивость механических свойств грунтов при прохождении через них сейсмических волн, особенно это касается рыхлых увлажнённых грунтов (песков, глин, суглинков). Дело в том, что такие грунты состоят из мельчайших частиц, в порах между которыми находятся вода и газы. Прочность таких грунтов при восприятии нагрузок обеспечивается за счёт большого числа связей между частицами, но многие из этих связей очень слабы. При сейсмическом воздействии часть связей разрывается. В итоге прочность грунта значительно снижается, а построенное на нем здание может опрокинуться. Весьма ярким примером такого поведения грунтов являются последствия землетрясения в городе Ниигату с магнитудой $M = 7,5$, эпицентр которого находился на расстоянии 60 км на острове Хонсю (Япония). К. Абе писал о последствиях этого землетрясения, а также дал оценку количественных параметров [14]. В результате этого землетрясения сейсмостойкие жилые дома средней этажности 4, 5 внезапно опрокинулись, потеряв устойчивость, повернулись вокруг продольной оси и заняли почти горизонтальное положение. По мнению специалистов, исследовавших этот случай,

потеря устойчивости произошла в результате увлажнения песчаного основания, уменьшения его несущей способности и неравномерной осадки основания. Всё вышесказанное обосновывает необходимость развития существующих методик для расчёта сейсмостойкости зданий и сооружений и более детального анализа поведения здания в целом и его конструкций.

Цель исследования

Скорость распространения сейсмических волн в скальных грунтах на эпицентральных расстояниях до 50 м выше, чем в рыхлых, но с увеличением эпицентральных расстояний на рыхлых грунтах наблюдаются более высокие амплитуды колебаний. В исследованиях Х.Р. Зайнулабидовой [15] показано, что уменьшение модуля деформации грунта приводит к уменьшению скоростей сейсмической волны и, как следствие, к уменьшению длины волны. Например, при скорости 400 м/с (соответствует суглинкам) длина волны составит 40 м, что соизмеримо с габаритами зданий и сооружений.

По мере продвижения под фундамент здания волна оказывает на него давление, представляющее собой подвижную несимметричную нагрузку. Вертикальная составляющая этой нагрузки создаёт момент относительно горизонтальной оси здания. Этот внешний момент с течением времени изменяется и вызывает раскачивание здания. Отражение волн от границ слоя усиливает этот эффект. Деформация перестаёт быть линейной. Вслед за ударными сейсмическими волнами, если среда упругая до некоторого предела, возникают пластические волны, распространяющиеся с меньшей скоростью. Поэтому при сильных землетрясениях в осадочном слое основную часть сейсмического эффекта передают зданиям именно пластические волны. Для оценки сейсмостойкости зданий это обстоятельство является важным, так как именно пластические волны раскачивают здание. Пластичные волны возникают в рыхлых, пористых грунтах, поэтому, учитывая физико-механические характеристики грунтов, можно оценить надёжность зданий.

Цель исследования – разработать методику расчёта зданий с учётом характеристик грунтов. Акселерограммы возможных землетрясений моделируются с применением компьютерной программы, позволяющей учитывать грунтово-геологические условия местности (мощность рыхлого слоя грунта, преобладающий период колебаний, продолжительность интенсивной фазы землетрясения, максимальные ускорения колебаний грунта и др.), которые, в свою очередь, влияют на спектры реакции акселерограмм грунтов. Применимость синтезированных акселерограмм, полученных в работе для расчётов на сейсмические воздействия, оценивались на основе сопоставления параметров синтезированных акселерограмм с параметрами зарегистрированных записей землетрясений. При этом сравнивались записи, грунтово-геологические условия которых сопоставимы. Так, например, на рис. 1 представлена синтезированная акселерограмма с заданным максимальным ускорением колебания грунта $0,3 \text{ м/с}^2$, что соответствует 8-балльному землетрясению по СП 14.13330, и приведена запись землетрясения, зафиксированная в Эль-Центро 18 мая 1940 г. с магнитудой $M = 6,7$, максимальное ускорение колебания грунта $0,33 \text{ м/с}^2$, преобладающие периоды интенсивных колебаний находятся в интервале $0,3\text{--}0,4 \text{ с}$.

Сравнительный анализ представленных записей показывает, что при сходных исходных данных отклик сопоставим.

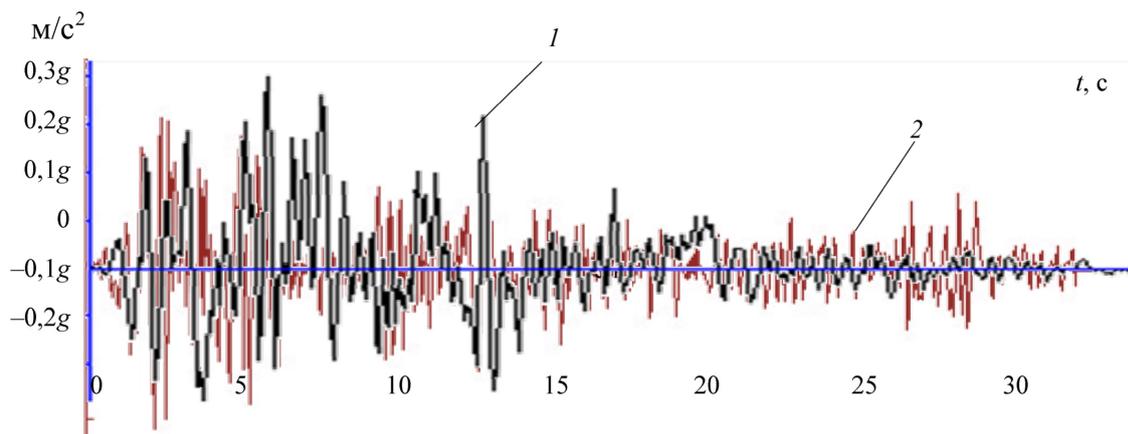


Рис. 1. Акселерограммы: 1 – синтезированная акселерограмма при сейсмическом воздействии с параметрами $a_{\max} = 0,3g$, $T_j = 0,4$, $\Delta t = 0,01$, $\xi = 0,05$; 2 – запись акселерограммы землетрясения в Эль-Центро 18 мая 1940 г. с магнитудой $M = 6,7$

Fig. 1. Accelerograms: 1 – synthesized accelerogram under seismic action with parameters $a_{\max} = 0.3g$, $T_j = 0.4$, $\Delta t = 0.01$, $\xi = 0.05$; 2 – recording of the accelerogram of the earthquake in El Centro on May 18, 1940 with a magnitude of $M = 6.7$

И так как основным фактором, влияющим на поведение грунта при сейсмических воздействиях, являются грунтово-геологические характеристики, которые, в свою очередь, в значительной степени могут отличаться в зависимости от региона, представляется целесообразным применение представленного метода расчёта зданий, учитывающего региональный характер воздействия.

Крутящий момент здания

Многоэтажные здания относятся к особо ответственным, поэтому при проектировании таких зданий в сейсмоопасных районах необходимо выполнять расчёты на динамические воздействия с применением имеющихся записей сейсмических воздействий. При отсутствии таких записей расчёты выполняют с применением синтезированных акселерограмм, количественные параметры которых (максимальные и расчётные ускорения колебаний, преобладающие периоды и др.) соответствуют данной территории.

Под воздействием сейсмической волны здание получает горизонтальные и вертикальные линейные смещения, а также крутящий момент. Эти перемещения связаны, и даже в простейшем случае для их определения необходимо решить три совместных дифференциальных уравнения движения в частных производных. Но эту задачу можно упростить, если разложить бегущую волну на две составляющие – симметричную и обратно симметричную. Тогда от симметричной волны будут возникать только поступательные вертикальные смещения здания, а от обратно симметричной – только повороты здания, т.е. произойдёт разделение связанных уравнений движения.

Дифференциальное уравнение вращательного движения в матричной форме для единичного воздействия можно записать в виде уравнения (1), предложенного А.А. Яворским и Б.М. Детлаф в работе [16]:

$$[I_0] \frac{\partial^2 \gamma}{\partial t^2} + [r_{11}] \dot{\gamma} = \left[1 \left(\frac{b}{2} - Vt \right) \right], \quad (1)$$

где, I_0 – матрица моментов инерции; r_{11} – матрица единичных реакций; γ – угол поворота здания; b – ширина здания; V – скорость распространения сейсмической волны.

Решение уравнения (1) имеет вид

$$\bar{\gamma}_i = \frac{1}{I_0 \cdot \omega_i^2} \cdot \left[b \cdot \left(\frac{1 - \cos 2 \cdot \omega_i \cdot t}{2} \right) - V \cdot \left(t - \frac{\sin \omega_i \cdot t}{\omega_i} \right) \right], \quad (2)$$

где ω_i – i -ая частота свободных вращательных колебаний здания, t – время сейсмического воздействия, V – скорость перемещения сейсмических волн под зданием.

Уравнение (2) определяет угол поворота здания. В интегральной форме формулу (2) можно представить в виде

$$\bar{\gamma}_i = \int_0^t \frac{1}{I \cdot \omega_i^2} \cdot \left[\frac{b \cdot (1 - \cos \omega_i \cdot t)}{2} - V \cdot \left(t - \frac{\sin \omega_i \cdot t}{\omega_i} \right) \right] \cdot \dot{y}(t_1 - t) dt_1. \quad (3)$$

Решение уравнения (3) позволит оценить последствия динамических воздействий, возможных при землетрясениях различной интенсивности, с учётом грунтово-геологических условий.

Сейсмическое воздействие здесь описывается синтезированными акселерограммами, полученными при помощи компьютерной программы, описанной в работе А.Д. Абакарова и Х.Р. Зайнулабидовой [17], в основе которой лежит модель сейсмических колебаний, воздействие которых произведено в виде нестационарных случайных процессов. Преимущество метода случайных колебаний состоит в возможности получить аналитические оценки реакции систем в зависимости от параметров воздействия, а по ним оценить надёжность того или иного конструктивного решения здания. Наибольший интерес в данном случае представляют параметры откликов при сильных землетрясениях с заданными параметрами (максимальным ускорением колебания грунта, соответствующим 8-балльному землетрясению по шкале Медведева [18], преобладающим периодом колебаний, продолжительностью интенсивной фазы землетрясения и др.). Случайный нестационарный процесс в программе задан с корреляционной функцией:

$$\kappa(\tau) = e^{-\alpha_j \cdot |\tau|} \cdot \cos \omega_j \cdot \tau, \quad (4)$$

где α_j – параметр, характеризующий быстроту убывания корреляционной связи между ординатами случайного процесса при увеличении разности аргументов этих ординат τ .

Математическое построение модели сейсмического воздействия здесь произведено на основе модели сейсмического движения грунта, предложенной в ЦНИИСК им. Кучеренко, в виде множества нестационарных гауссовских мультипликативных случайных процессов [19]:

$$Y(t, \omega, \omega_j) = A(t, \omega_j) \cdot \sigma(\omega_j) \cdot \varphi(t, \omega_j), \quad (5)$$

где $A(t, \omega_j) = A_j \cdot t \cdot e^{-\varepsilon_i \cdot t}$ – огибающая функция, задаваемая при фиксированных ω_j в виде импульса Берлаге и нормированная так, что $|A_{\max}| = 1$;

$\sigma(\omega_j)$ – среднеквадратическое значение ускорения колебания грунтов;

ε_i – параметр, определяющий форму временной огибающей генерируемого воздействия,

$\varphi(t, \omega_j)$ – нормированный (единичный) стационарный гауссовский процесс, характеризующийся корреляционной функцией (4).

На рис. 2 показана усреднённая акселерограмма по 20 реализациям.

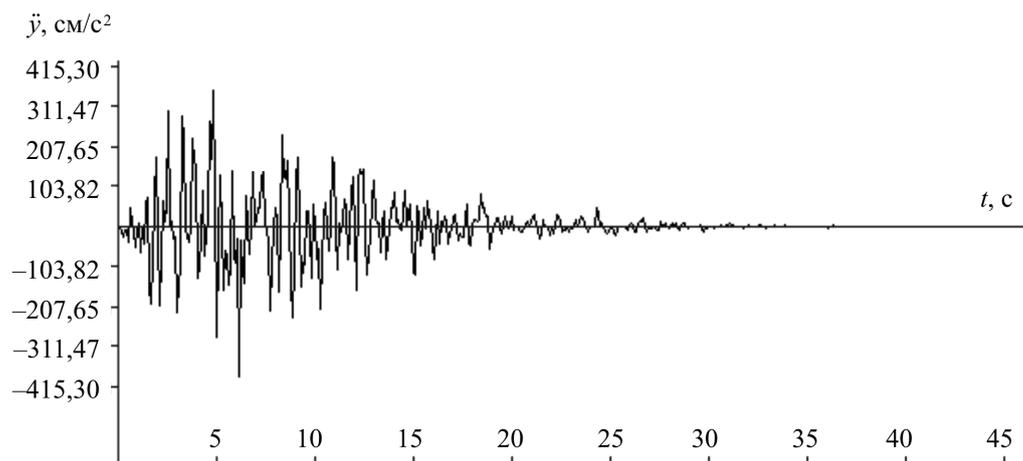


Рис. 2. Усреднённая псевдоакселерограмма с заданными характеристиками:

$$\ddot{j} = 300 \text{ cm/c}^2, \omega_j = 20,93 \text{ Гц}$$

Fig. 2. Averaged pseudoaxellerogram with the specified characteristics:

$$\ddot{j} = 300 \text{ cm/s}^2, \omega_j = 20.93 \text{ Hz}$$

Для определения влияния скорости колебаний грунтов на угол вращения здания были проведены расчёты на сейсмические воздействия с использованием зависимости (3) при заданных максимальных ускорениях колебаний грунтов 100, 200, 300, 400 и 500 см/с² с преобладающими частотами колебаний $\omega_j = 20,93$ и 12,56 Гц. Результаты расчётов приведены на рис. 3, а, б.

Графики на рис. 3 получены при воздействии простых волн с ускорениями $\ddot{j} = \ddot{j}_0 \cdot \frac{T}{b}$ при заданных размерах здания.

\ddot{j}_0 – ускорение волны, с которым она пройдёт под всем зданием за время, равное основному периоду T колебаний.

Величина кручения здания зависит от физико-механических характеристик грунтов, которые учитываются через коэффициент ε_i . При увеличении ускорений колебаний грунтов увеличивается момент кручения здания, при этом уменьшается угол вращения. Большие скорости сейсмических волн, характерные скальным основаниям, уменьшают углы вращения здания. Так, при ускорениях $\ddot{j} = 500 \text{ cm/c}^2$ отношение $\bar{\gamma} / \gamma = 2,8$, а при $\ddot{j} = 100 \text{ cm/c}^2$ – $\bar{\gamma} / \gamma = 6,2$, т.е. угол наклона здания с увеличением ускорений в 5 раз уменьшается почти в 2,5 раза. Исследование влияния преобладающего периода колебаний грунтов на кинематические характеристики здания (см. рис. 3) показал, что смещение колебаний в область длиннопериодных приводит к затяжному смещению, что увеличивает вероятность опрокидывания.

Проектирование с учётом общей устойчивости и записей сейсмических воздействий может дать целостную картину поведения зданий при сейсмических воздействиях, что обеспечит большую надёжность.

Общая устойчивость здания, если учитывается смена устоявшегося режима работы системы

Потеря общей устойчивости здания может произойти по двум формам. Если начальный угол наклона здания γ_0 равен нулю, то наибольшая вертикальная нагрузка, вызывающая потерю устойчивости, будет определяться как для прямолинейного стержня.

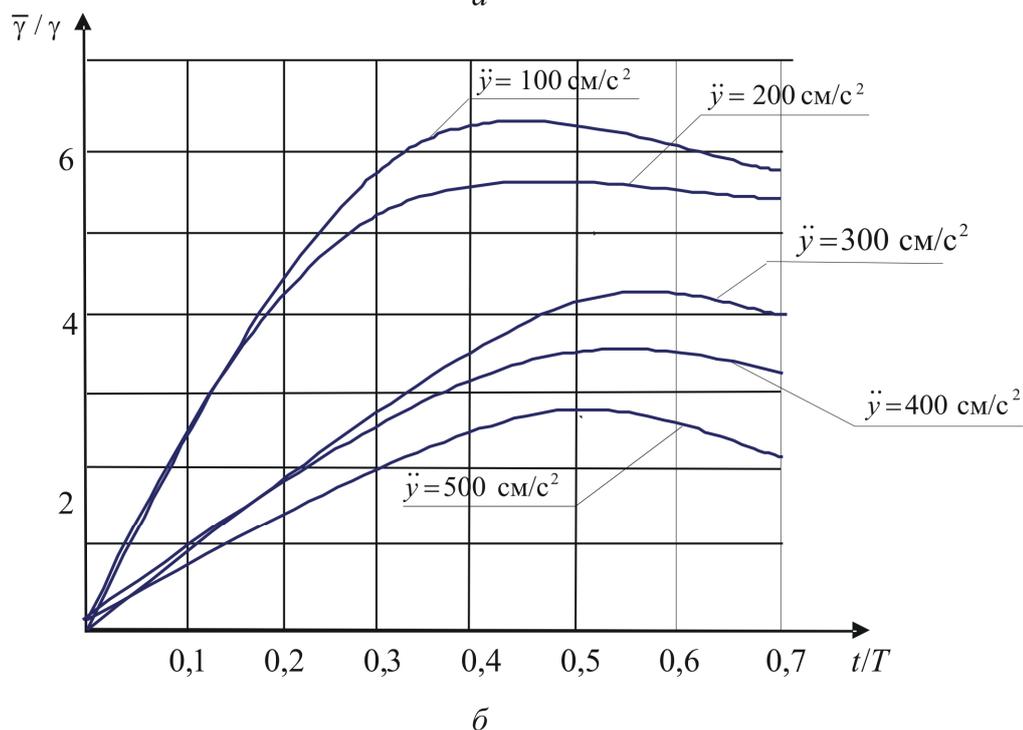
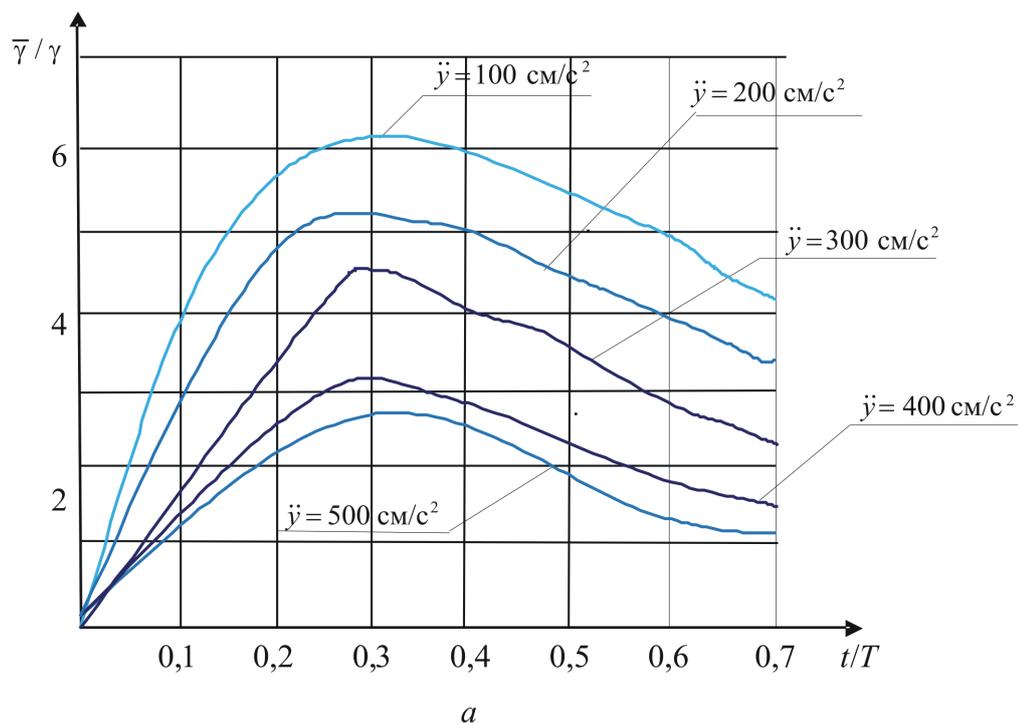


Рис. 3 График изменения угла наклона здания при сейсмических воздействиях:
 $a - \omega_j = 20,93 \text{ Гц}$; $b - \omega_j = 12,56 \text{ Гц}$
 Fig. 3 Graph of the change in the angle of inclination of the building under seismic influences:
 $a - \omega_j = 20.93 \text{ Hz}$; $b - \omega_j = 12.56 \text{ Hz}$

Вводя в расчёт упругое основание, получим другую форму потери устойчивости (рис. 3, б).

Для определения нагрузки, при которой теряется устойчивость системы «здание – упругое основание», рассмотрим два возможных условия равновесия [20]. Первое урав-

нение равновесия соответствует прямолинейной форме и записывается как проекция всех сил на вертикаль

$$\sum P_i = \int_{-b/2}^{b/2} p dx, \quad (6)$$

где p – реакция основания на 1 п.м. ширины фундамента.

Второе уравнение соответствует второй форме потери устойчивости, когда вертикальная ось здания имеет отклонение на угол γ и выражает равенство нулю моментов всех сил, приложенных к системе

$$\sum P_i (\gamma + \gamma_0) \cdot H_i + \int_{-b/2}^{b/2} p x dx = \beta \cdot H \cdot \alpha^2, \quad (7)$$

где, $\beta \cdot H \cdot \alpha^2$ – момент, характеризующий устойчивость системы, возникающий в основании при отклонении оси здания на угол γ в результате потери устойчивости.

При некоторых преобразованиях уравнения (5) можно получить ряд в виде

$$P = P_0 \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{4 \cdot \beta}{E \cdot b/2} \cdot \frac{H}{b} \cdot \gamma \right)^2} + \dots, \quad (8)$$

P – нагрузка с учётом потери устойчивости системы; P_0 – нагрузка без учёта раскачивания здания, вызванного сейсмическими волнами; E – модуль деформации основания; β – характеристика восстанавливающего момента.

Формула (6) позволяет оценить влияние угла γ наклона здания, возникающего в результате бегущей сейсмической волны на снижение той нагрузки, при которой произойдёт потеря устойчивости здания. В данном случае такой нагрузкой является собственный вес здания. Потеря устойчивости зависит от многих параметров. Рассмотрим влияние каждого из них в отдельности.

На рис. 4 показано снижение P в зависимости от угла наклона системы γ высотой 30 м, что соответствует 8-этажному зданию. Из графика видно, что в результате раскачивания здания под воздействием сейсмических волн величина критической нагрузки, при которой наступает потеря устойчивости здания, снижается до 1,5 раз при $E = 100$ кгс/см² и в 10 раз при $E = 10$ кгс/см².

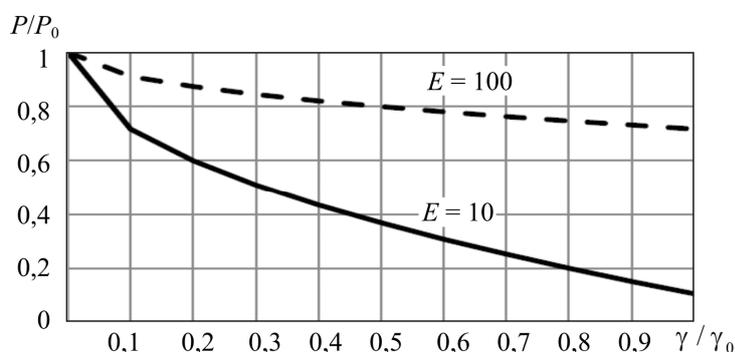


Рис. 4. Графики зависимости снижения критической нагрузки от угла наклона здания и модуля деформации E

Fig. 4. Graphs of the dependence of the reduction of the critical load on the angle of inclination of the building and the modulus of deformation E

На рис. 5 показаны графики зависимости критической нагрузки от высоты здания и модуля деформации грунта. Так, сравнение показателей снижения критической нагрузки при высотах здания 65 м (17–18 этажей) и 10 м (3 этажа) при $E = 100 \text{ кгс/см}^2$ показало, что при увеличении высоты здания на 55 м нагрузка возрастает в 1,3 раза. Но если модуль упругости грунта составляет примерно 10 кгс/см^2 , что соответствует пористым глинам, суглинкам, пылеватым пескам, то при высоте 50 м и более нагрузка стремится к нулю.

На рис. 5 показан график изменения коэффициента соотношения P/P_0 в зависимости от отношения высоты здания H к ширине его фундамента b .

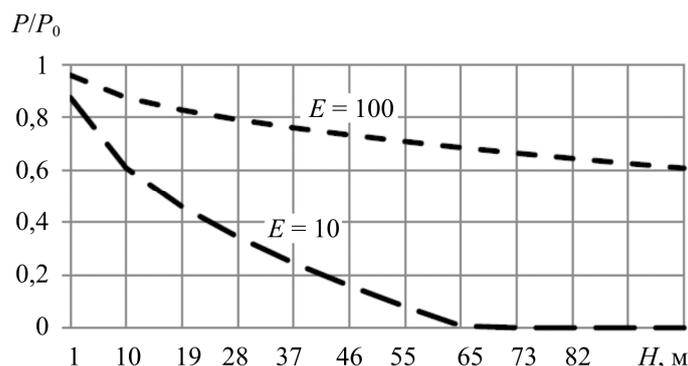


Рис. 5. Графики зависимости снижения критической нагрузки от высоты здания и модуля деформации E при $\gamma = 0,002$

Fig. 5. Graphs of the dependence of the reduction of the critical load on the height of the building and the deformation modulus E at $\gamma = 0.002$

На рис. 6 показаны графики, соответствующие углам раскачивания здания начиная от малого угла раскачивания $\gamma = 0,001$ до большого угла $\gamma = 0,01$. С увеличением угла наклона здания происходит существенное снижение нагрузки P .

Например, при $H/h = 7$ это соответствует 7–8-этажному зданию, коэффициент устойчивости при $\gamma = 0,001$ снижается почти в 10 раз.

Другим очень важным параметром является E – модуль деформации грунта. С увеличением E коэффициент P возрастает. На рис. 7 построены графики изменения P в зависимости от величины модуля при угле $\gamma = 0,001$.

При модуле деформации $E = 500 \text{ кгс/см}^2$, что соответствует скальному основанию, почти не происходит снижения коэффициента запаса. Но при $E = 10 \text{ кгс/см}^2$ (водонасыщенный мелкий песок) коэффициент запаса уменьшается в 2 раза.

Таким образом, высота здания и модуль деформации грунта являются основными параметрами, от которых зависит снижение потери устойчивости здания.

Применим данную методику для расчёта конкретного примера.

Проверим устойчивость здания со следующими исходными данными:

высота здания $H = 50 \text{ м}$; ширина основания $b = 15 \text{ м}$; нагрузка $P = 700 \text{ т/м}$;

момент инерции $I = 2400 \text{ кН/ (с}^2 \cdot \text{м)}$; основание – пылеватый песок с $E = 10 \text{ кгс/см}^2$;

скорость сейсмических волн $V = 400 \text{ м/с}$.

На рис. 8 построен график при воздействии землетрясения с преобладающим периодом колебания $T_j = 0,6 \text{ с}$ и максимальным ускорением колебания грунта $a_{\text{max}} = 200 \text{ см/с}^2$.

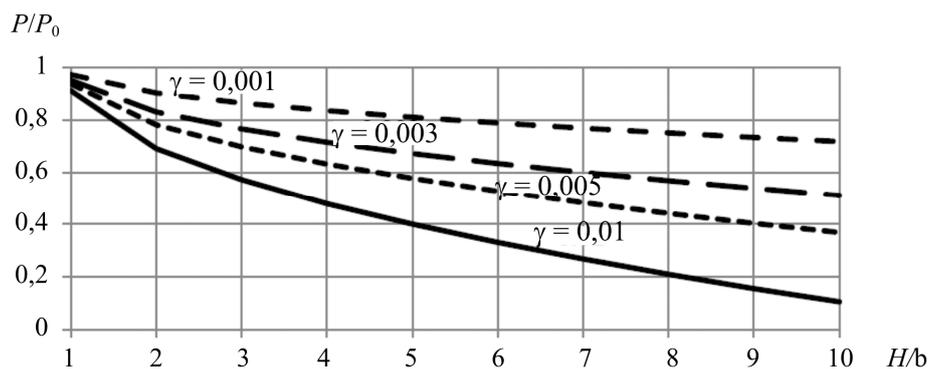


Рис. 6. Графики снижения нагрузки в зависимости от угла наклона
 Fig. 6. Graphs of load reduction depending on the angle of inclination

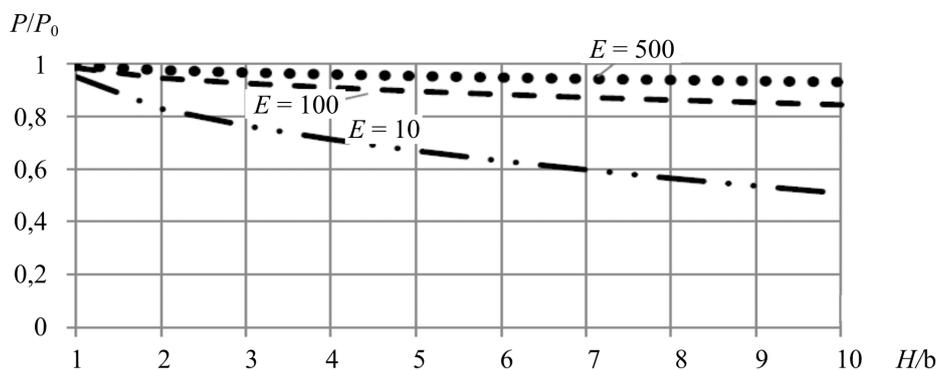


Рис. 7. График зависимости увеличения нагрузки на здание при сейсмических воздействиях в зависимости от величины модуля упругости грунта E
 Fig. 7. Graph of the dependence of the increase in the load on the building during seismic impacts, depending on the magnitude of the elastic modulus of the soil E

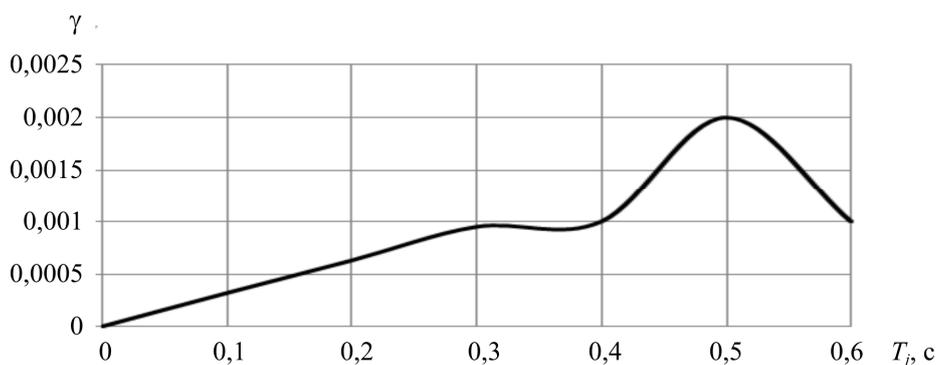


Рис. 8. Зависимость угла наклона здания γ при землетрясении от преобладающих периодов колебаний грунтов T_j

Fig. 8. Dependence of the angle γ of the slope of the building during an earthquake on the prevailing periods of soil fluctuations T_j

По графику определяем максимальный угол наклона γ , он равен 0,002. По графику на рис. 5 для $E = 10 \text{ кгс/см}^2$ определим соотношение $P/P_0 = 0,1$. Определим $P_0 = 0,1 \cdot 700 = 70 \text{ т/м}$.

Из полученного результата следует, что если собственный вес здания на 1 м его длины больше 70 т/м, то здание потеряет устойчивость.

Выводы

Сложное поведение грунтов при землетрясениях связано с их неоднородным строением, пористостью, водонасыщенностью и другими физико-механическими характеристиками. Структура среды определяет характер деформации грунтов, а также нелинейный характер поведения при сейсмических воздействиях. Это, в свою очередь, играет существенную роль при рассмотрении многих задач строительной механики, в том числе и при определении надёжности зданий. Разрушение сейсмостойких зданий при землетрясениях чаще всего связано с неблагоприятным поведением рыхлых грунтов и основания, которые вызывают такие эффекты, как усиление колебаний грунтов на определённых частотах, внезапная частичная потеря прочности, разжижение. Поэтому аналитическое рассмотрение особенностей взаимодействия здания и основания является важной задачей, которую необходимо развивать.

Научная новизна работы заключается в разработке методики расчёта зданий с применением компьютерной программы на сейсмические воздействия с учётом мощности рыхлого слоя, а также его физико-механических характеристик.

Для наглядности в исследованиях реализована предложенная методика на примере расчёта здания высотой 50 м. Показано, каким образом и какие параметры оказываются существенными при расчётах зданий на слабых деформируемых грунтах.

Финансирование. Исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Вклад авторов. Все авторы сделали равный вклад в подготовку публикации.

Библиографический список

1. Atico, Peru Mw8.4 Earthquake on June 23, 2001 / Ed. Curtis L. Edwards. – Reston, Virginia: ASCE, TCLEE. – 2002.
2. Evidence for surface faulting during the September 26, 1997, Colfiorito (Central Italy) earthquakes / G. Cello, G. Deiana, P. Mangano, S. Mazzoli, E. Tondi // J. Earthquake Engineering. – 1998. – Vol. 2, № 2. – P. 303–324.
3. Cucci L., Alfonsi L., Villani F. A new photographic dataset of the co seismic geological effects originated by the Mw 5.9 Visso and Mw 6.5 Norcia earthquakes (26th and 30th October 2016, Central Italy) // Emergeo Working Group, Technical Report. – October 2017. – № 38. DOI: 10.13140/RG.2.2.36418.07368
4. Tsunami source of the unusual AD 869 earthquake off Miyagi, Japan, inferred from tsunami deposits and numerical simulation of inundation / K. Satake, Y. Sawai, M. Shishikura, Y. Okamura, Y. Namegaya; S. Yamaki // American Geophysical Union, Fall Meeting 2007, abstract T31G-03.
5. Strong ground motion from the Mochoacan, Mexico, Earthquake / J.G. Anderon, J.N. Brune, J. Prince, S.K. Singh, R. Quaas, M. Onate // Science (American Association for the Advancement of Science). – 1986. – № 233 (4768): 1043. DOI: 10.1126/science.233.4768.1043
6. Татевосян Р.Э., Мокрушина Н.Г. Использование современного сейсмического события для оценки магнитуды исторического землетрясения: глубокофокусное Карпатское землетрясение 26 октября 1802 года // Физика Земли. – 2004. – № 6. – С. 14–25.
7. Уломов В.И. О сейсмических воздействиях на высотные здания и сооружения г. Москвы // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. – 2008. – № 2. – С. 62–65. – URL: http://seismos-u.ifz.ru/p/o_seismicheskikh_vozdeistv.pdf (дата обращения: 02.02.2022).

8. Марченков А.Ю., Капустян Н.К., Смирнов Б.В. Опыт регистрации сейсмического воздействия на высотное здание МГУ // Геофизические исследования. – 2015. – Т. 16, № 3. – С. 31–42.
9. Тяпин А.Г., Топорков А.С., Михайлов В.С. Применение комбинированного асимптотического метода для расчета высотного здания на сейсмическое воздействие: результаты // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. – 2018. – № 4. – С. 32–43.
10. Мкртычев О.В., Джинчвелашвили Г.А. Проблемы учета нелинейностей в теории сейсмостойкости (гипотезы и заблуждения). – М.: МГСУ, 2012. – 192 с.
11. Озмидов О.Р. Оценка риска сейсмического разжижения грунтов геологического основания объектов олимпийского строительства в г. Сочи // Вестник Российской академии естественных наук. – 2014. – № 1. – С. 48–54.
12. Aki K., Richards P.G. Quantitative seismology. – 2nd ed. – University Science Books, 2002.
13. Геологическая служба США. – URL: <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/event-page/us60003sc0> (дата обращения: 02.02.2022).
14. Abe K. Magnitude of large shallow earthquakes from 1904 to 1980 // *Earth Planet. Inter.* – 1981. – Vol. 27. – P. 72–92.
15. Zainulabidova Kh.R. Nonlinear behavior of soils under exposure to seismic activity // *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. – 2019. – Vol. 56, iss. 1. – P. 48–53.
16. Яворский А.А., Детлаф Б.М. Физика. – М.: Дрофа, 1998. – 795 с.
17. Абакаров А.Д., Зайнулабидова Х.Р. Моделирование искусственных акселерограмм / Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ, рег. № 2019661478 от 02.09.2019. – М.: Роспатент, 2019.
18. Медведев С.В. Инженерная сейсмология. – М.: Гос. изд-во по строительству и архитектуре, 1962. – 284 с.
19. Айзенберг Я.М. Сооружения с выключающимися связями для сейсмических районов. – М.: Стройиздат, 1976. – 232 с.
20. Ржаницын А. Р. Устойчивость равновесия упругих систем. – М.: Гостеортехиздат, 1955. – 475 с.

References

1. Atico, Peru Mw8.4 Earthquake on June 23, 2001. Ed. Curtis L. Edwards. Reston, Virginia: ASCE, TCLEE, 2002.
2. Cello G., Deiana G., Mangano P., Mazzoli S., Tondi E. Evidence for surface faulting during the September 26, 1997, Colfiorito (Central Italy) earthquakes. *J. Earthquake Engineering*, 1998, vol. 2, no. 2, pp. 303-324.
3. Cucci L., Alfonsi L., Villani F. A new photographic dataset of the co seismic geological effects originated by the Mw 5.9 Visso and Mw 6.5 Norcia earthquakes (26th and 30th October 2016, Central Italy). *Emergeo Working Group, Technical Report*. October 2017, no. 38. DOI: 10.13140/RG.2.2.36418.07368
4. Satake K., Sawai Y., Shishikura M., Okamura Y., Namegaya Y., Yamaki S. Tsunami source of the unusual AD 869 earthquake off Miyagi, Japan, inferred from tsunami deposits and numerical simulation of inundation. *American Geophysical Union, Fall Meeting 2007*, abstract T31G-03.
5. Anderson J.G., Brune J.N., Prince J., Singh S.K., Quaas R., Onate M. Strong Ground Motion from the Mochoacan, Mexico, Earthquake. *Science (American Association for the Advancement of Science)*, 1986, no. 233 (4768): 1043. DOI: 10.1126/science.233.4768.1043.

6. Tatevosyan R.E., Mokrushina N.G. Using a modern seismic event to estimate the magnitude of a historical earthquake: the deep-focus Carpathian earthquake of October 26, 1802. *Physics of the Earth*, 2004, no. 6, pp. 14-25.
7. Ulomov V.I. About seismic impacts on high-rise buildings and structures in Moscow. *Construction materials, equipment, technologies of the XXI century*, 2008, no. 2, pp. 62-65. URL: http://seismos-u.ifz.ru/p/o_seismicheskikh_vozdeistv.pdf.
8. Marchenkov A.Yu., Kapustyan N.K., Smirnov B.V. Experience of registration of seismic impact on a high-rise building of Moscow State University. *Geophysical research*, 2015, vol. 16, no. 3, pp. 31-42.
9. Tyapin A.G., Toporkov A.S., Mikhailov V.S. Application of the combined asymptotic method for calculating a high-rise building for seismic impact: results. *Earthquake-resistant construction. Safety of structures*, 2018, no. 4, pp. 32-43.
10. Mkrtychev O.V., Jinchvelashvili G.A. Problems of accounting for nonlinearities in the theory of seismic resistance (hypotheses and misconceptions). Moscow, MGSU, 2012, 192 p.
11. Ozmidov O.R. Assessment of the risk of seismic liquefaction of soils of the geological base of Olympic construction facilities in Sochi. *Bulletin of the Russian Academy of Natural Sciences*, 2014, no. 1, pp. 48-54
12. Aki, Keiiti; Richards, Paul G. Quantitative seismology. 2nd ed. University Science Books, 2002.
13. US Geological Survey / available at: <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/event-page/us60003sc0>.
14. Abe K. Magnitude of large shallow earthquakes from 1904 to 1980. *Earth Planet. Inter.*, 1981, vol. 27, pp. 72-92.
15. Zainulabidova Kh.R. Nonlinear behavior of soils under exposure to seismic activity. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 2019, vol. 56, iss. 1, pp 48-53.
16. Yavorsky A.A. Detlaf B.M. Physics. Moscow, Bustard, 1998, 795 p.
17. Abakarov A.D., Zainulabidova H.R. Modeling of artificial accelerograms. Certificate of state registration of a computer program, reg. No. 2019661478 (2019).
18. Medvedev S.V. Engineering seismology. Moscow, State Publishing House on construction and architecture, 1962, 284 p.
19. Eisenberg Ya. M. Structures with switching connections for seismic areas. Moscow, Stroyizdat, 1976, 232 p.
20. Rzhantsin A.R. Stability of equilibrium of elastic systems. Moscow, Gosteortehizdat, 1955, 475 p.