

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА
BUILDING AND ARCHITECTURE

УДК 624.921

DOI: 10.21822/2073-6185-2022-49-2-110-122

Оригинальная статья /Original Paper

Особенности региональных параметров колебания грунта как основа принятия оптимального проектного решения

Х.Р. Зайнулабидова, Р.Г. Гасанов

Дагестанский государственный технический университет,
367026, г. Махачкала, пр. И. Шамиля, 70, Россия

Резюме. Цель. Целью данного исследований является разработка методики оценки сейсмической опасности территорий и методики принятия оптимального проектного решения, основанного на различных критериях, в том числе и на критерии количественных параметров колебаний грунтов, учитывающих региональные особенности. **Метод.** Произведена оценка количественных параметров сейсмических событий, зарегистрированных на территории Республики Дагестан и смежных районов аналитическими и численными методами. Определена надёжность зданий на основе вероятностных моделей. **Результат.** Предложена методика оценки параметров колебаний грунтов на основе обработки инструментальных записей известных землетрясений, учитывающая особенности грунтов. Предложена методика принятия оптимального проектного решения, учитывающая параметры колебаний грунтов и другие целевые функции. **Вывод.** Анализ полученных результатов показал, что с увеличением толщины рыхлого слоя увеличивается величина максимального ускорения, а диапазон неустойчивых колебаний периодов при этом лежит в интервале 0,1-0,5 сек. Строительство зданий должно быть основано на параметрах колебаний грунтов строительной площадки с учётом литологического состава грунта и других физико-механических свойств.

Ключевые слова: землетрясения, сейсмоактивные зоны, ускорения колебания грунтов, частота, длительность землетрясений, сейсмические свойства, вероятность безотказной работы, критерии надёжности, оптимальное проектное решение

Для цитирования: Х.Р. Зайнулабидова, Р.Г. Гасанов. Особенности региональных параметров колебания грунта как основа принятия оптимального проектного решения. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2022; 49(2): 110-122. DOI:10.21822/2073-6185-2022-49-2-110-122

Features of regional parameters of soil fluctuations as a basis for making an optimal design decision

H.R. Zainulabidova, R.G. Gasanov

Daghestan State Technical University,
70 I. Shamil Ave., Makhachkala, 367026, Russia

Abstract. Objective. The purpose of these studies is to develop a methodology for assessing the seismic hazard of territories and a methodology for making an optimal design decision based on various criteria, including criteria for quantitative parameters of soil vibrations, taking into account regional peculiarities. **Method.** Estimation of quantitative parameters of seismic events registered on the territory of the Republic of Dagestan and adjacent areas by analytical and numerical methods. Determination of the reliability of buildings based on probabilistic models. **Result.** A method for estimating the parameters of soil vibrations based on the processing of instrumental records of known earthquakes, taking into account the characteristics of soils, is proposed. A method for making an optimal design decision is proposed, taking into account the parameters of soil vibrations and other target functions. **Conclusion.** The analysis of the obtained results showed that with an increase in the thickness of

the loose layer, the magnitude of the maximum acceleration increases, the range of unstable fluctuations of the periods at the same time lies in the range of 0.1-0.5 seconds. The construction of buildings should be based on the parameters of the vibrations of the soils of the construction site, taking into account the lithological composition of the soil and other physical and mechanical properties.

Keywords: earthquakes, seismically active zones, acceleration of ground vibrations, frequency, duration of earthquakes, seismic properties, probability of trouble-free operation, reliability criteria, optimal design solution

For citation: H.R. Zainulabidova, R.G. Gasanov. Features of regional parameters of soil fluctuations as a basis for making an optimal design decision. Herald of the Daghestan State Technical University. Technical Science. 2022; 49(2): 110-122. DOI:10.21822/2073-6185-2022-49-2-110-122.

Введение. Сейсмичность районов Дагестана можно связать с коллизией Аравийского континентального блока с Евроазиатской литосферной плитой. Движение Аравийского блока составляет около 2 см в год. Для анализа существующей сейсмической опасности была изучена тектоническая особенность рассматриваемой территории.

Согласно карте эпицентров землетрясений Северного Кавказа [1] изучаемая территория входит в кайнозойский или предгорный тектонический комплекс, ограниченный с севера равнинным, а с запада горным тектоническими комплексами. Наиболее крупным тектоническим элементом района является область Дагестанского клина, который представляет собой сложный узел глубинных разломов разных направлений. Здесь близко сходятся глубинные разломы общекавказской ориентировки, пересекающиеся с Гудермесско-Моздокским сдвигом и серией поперечных разломов [2]. С севера и с востока область Дагестанского клина оконтурена передовым Терско - Каспийским краевым прогибом, переходящим на юге в Кусаро - Дивический передовой прогиб. На существование глубинных разломов указывают такие факторы, как резкие изгибы рельефа, минеральные источники, зоны повышенной трещиноватости пород, существующие очаги землетрясений. По историческим данным за прошлые века имеется достаточное количество сведений о сильных землетрясениях.

В целом эти данные имеют описательный характер, инструментальных записей сильных землетрясений нет. Анализируя каталог землетрясений и карту распределения сотрясений в населённых пунктах, можно сделать вывод, что довольно систематические данные о землетрясениях поступают с XIX века, т.е. со времени более интенсивного его заселения. В последние годы происходит интенсификация сейсмических событий. Наибольшую опасность для рассматриваемой территории представляют очаговые зоны, расположенной на расстоянии около 40 км к западу от Махачкалы. Воздействие этих землетрясений ощутили на большей части территории Дагестана. Максимальная интенсивность была отмечена в городах Буйнакске, Кизилюрте и Махачкале и составила около 5-6 баллов. Землетрясения сопровождались многочисленными афтершоками. Кроме того, в Дагестане наблюдается сейсмическая активизация в районе Каспийского моря. В этой очаговой зоне зарегистрированы землетрясения с магнитудой около $M=4.2$. По данным Сейсмологической службы, на территории Дагестана за период с января 1999 по декабрь 2020 годы произошло более 1500 землетрясений с магнитудой $M \geq 2.0-2.5$, из них более 60-ти ощущались в населённых пунктах с интенсивностью от 2 до 5-ти баллов. Урбанизационные процессы, происходящие во всём мире повышающие сейсмический риск, коснулись и наших городов.

Постановка задачи. Хаотичная застройка характерная для Дагестана, а в особенности для Махачкалы, усугубила ситуацию с обеспечением сейсмической безопасности. Город Махачкала расположен на побережье Каспийского моря, при этом грунты весьма неоднородны, часть территории расположена на обводнённых песчаных грунтах, характеризующихся неустойчивостью. В мировой практике известны случаи, когда дома, расположенные на песчаных водонасыщенных грунтах, опрокидывались, вследствие неравномерной осадки основания.

Например, при землетрясении в городе Ниигату [3] с магнитудой $M=7,5$ и эпицентральной дистанцией $\Delta=60$ км сейсмостойкие 4-х и 5-ти этажные жилые дома внезапно опрокинулись, повернулись вокруг продольной оси и заняли горизонтальное положение [21], потеря

устойчивости произошла в результате увлажнения песчаного основания и как следствие, уменьшения его несущей способности. Всё выше сказанное обосновывает необходимость более тщательного изучения количественных характеристик колебаний грунтов для конкретных территорий.

Методы исследования. Изучая сейсмичность данной территории, было установлено, что сейсмическую интенсивность 8 баллов в районе г. Махачкала могут вызвать местные и близкие землетрясения, приуроченные к Дагестанскому клину с магнитудой 6.0-7.0 и эпицентральным расстоянием до 40 км. Вблизи г. Махачкала находятся две крупные очаговые зоны, которые неоднократно проявлялись в течение двух веков [4].

Первая очаговая зона расположена восточнее от города (в Каспийском море) на расстоянии до 30 км с максимальной магнитудой $M=6$ и глубиной очага 10 км [25].

Вторая зона расположена западнее города на расстоянии 40 км с максимальной магнитудой $M=6.7-7$, глубина очага 15 км. Согласно работе [5], повторяемость землетрясений класса $K=15(M=6)$ –35 лет, класса $K=17(M=7)$ равна 220 лет, а класса $K=16(M=6.7)$ – 85 лет.

Согласно [18] с 1830 по 1974 г. в первой очаговой зоне произошло одно землетрясение с максимальной магнитудой $M=5.8$. Во второй очаговой зоне за этот же период произошло два крупных землетрясения с магнитудой $M=7$ и $M=6.8$. Некоторые данные по этим событиям приведены в табл. 1 [6, 7].

Таблица 1. Список землетрясений, проявившихся в наиболее крупных очаговых зонах на территории Республики Дагестан

Table 1. List of earthquakes that occurred in the largest focal zones on the territory of the Republic of Dagestan

N п.п.	Дата Date	Координаты Coordinates		Т _н , период наблюдения observation period	M _{max} , магнитуда magnitude	J ₀ , балльность в эпицентре intensity at the epicenter	Примечания Notes
		φ° N	λ° E				
1	6.05.1958	43.14±0.1	47.77	170	5.8	8 ±1	Первая очаговая зона First focal zone
2	21.03.1960	42.9±0.2	47.8	170	5.1	7±1	
3	9.03.1830	43.0±0.5	47.0±0.5	170	7.0	8-9±0.5	Вторая очаговая зона Second focal zone
4	14.05.1970	43.0±0.1	47.09±0.1	170	6.8	8-9±0.5	
5	31.01.1999	43.12	46.97	170	5.15	6±0.5	Третья очаговая зона Third focal zone
6	21.02.1999	42.99	46.99	170	5.4	6-7±1	
7	11.10.2008	43.14	46.35	170	5.12	5±1	Четвертая очаговая зона Fourth focal zone
8	11.10.2008	43.46	45.87	170	5.74	5±1	

Землетрясения класса $K=15$ в Дагестане по инструментальным данным имеют повторяемость в среднем 35 лет. В первой изучаемой очаговой зоне за 170 лет произошло одно землетрясение с максимальной магнитудой $M=5.8$.

Исходя из этих данных, для очаговой зоны 1 примем повторяемость землетрясений класса $K=15$, равной 200 лет, с учётом степени существующей сейсмологической неопределённости она более вероятна. Приведённые выше повторяемости землетрясений класса $K=16$ и $K=17$ соответствуют 2-й очаговой зоне. Колебания от первой и второй очаговых зон по своей

интенсивности и количественным характеристикам сопоставимы, поэтому можно будет их объединить. Объединив потоки событий с повторяемостью 220 и 200 лет, получим поток с периодом повторяемости 100 лет. Оценку характеристик колебаний грунтов будем производить, используя данные второй очаговой зоны, но при этом увеличим частоту повторяемости ожидаемых событий.

Максимальное ускорение a_{100} можно оценить при помощи эмпирических зависимостей, полученных на основе обработки записей мирового банка данных землетрясений [25], зарегистрированных на скальных грунтах [8, 9, 10, 11], а также по инструментальным записям слабых землетрясений, экстраполированных в область сильных землетрясений, зарегистрированных на скальных грунтах исследуемой территории [11]. Результаты вычислений приведены в табл. 2.

Таблица 2. Сравнение максимальных ускорений колебаний грунта, полученных с использованием различных зависимостей

Table 2. Comparison of the maximum accelerations of ground vibrations obtained using various dependencies

N п/п	Формула Formula	Максимальное ускорение Maximum acceleration a_{100} м/с ²	Источник Source
1	$a = 5600 \cdot (R + 40)^{-2} \cdot \exp(0.8 \cdot M)$	232.6	[8]
2	$\lg a = 0.28 \cdot M - 0.8 \cdot \lg R + 1.7$	230	[9]
3	По палетке ускорений According to the palette of accelerations	238	[10]
4	По записям слабых землетрясений, экстраполированных в область сильных According to records of weak earthquakes extrapolated to the region of strong	240	[11]

Как видно из табл.2 результаты, полученные по зависимостям, в данных работах [8-10], в целом сходятся. Поэтому можно будет принять $a_{\max}$ равным 230 см/с². Эта оценка относится к скальным грунтам (категория 1).

Переход от амплитуд ускорений скальных грунтов к рыхлым, и определение соответствующих им периодов колебаний производился по методике, изложенной в работе [12] с помощью коэффициентов усиления.

При использовании этой методики учитываются мощности H_i и плотности ρ_i рыхлого слоя, скорости распространения поперечных сейсмических волн V_i , а также скорости распространения поперечных волн и плотность подстилающих пород. Среда рассматривается как упругий слой, лежащий на упругом полупространстве.

На основании имеющихся данных рассчитываются значения коэффициентов усиления m_i и n_i :

$$m_i = V_i \cdot \frac{\rho_i}{V_0} \cdot \rho_0; \quad n_i = H_i / V_i \cdot T_j$$

где T_j – период колебаний, соответствующий максимальной амплитуде ускорений.

Задавая различные значения периодов T_j , строятся зависимости ускорений колебаний рыхлых грунтов разных мощностей:

$$a_{\text{рых}} = f(H, T); \quad a_{\text{рых}} = a_{\text{ск}} \cdot k$$

где k – коэффициент усиления.

На территории г. Махачкалы в 1986-1988 гг. были выполнены работы по сейсмическому микрорайонированию. Используя результаты этой работы по вышеизложенной методике, были определены максимальные ускорения и преобладающие периоды колебаний рыхлых грунтов, при возможных сейсмических воздействиях с магнитудой $M=7$ для каждого инженерно-геологического участка изучаемой территории [23]. При этом к I категории грунтов отнесены верхнесарматские известняки и песчаники, слагающие гряду Анжи-Арка. К грунтам II категории по карте сейсмического микрорайонирования отнесены сарматские глины, элювиальные

глины и четвертичные глины, и суглинки полутвёрдой и тугопластичной консистенции [20]. К III категории отнесены водонасыщенные пески. В табл. 3 приведены некоторые результаты этих вычислений [24]. Используя данные расчётов табл.3, классифицируем грунты в соответствии с СП 14.13330.2018 на категории по сейсмическим свойствам и критерию максимальных ускорений колебаний.

Таблица 3. Категории грунтов по сейсмическим свойствам и критерию максимальных ускорений колебаний

Table 3. Categories of soils according to seismic properties and the criterion of maximum accelerations of vibrations

Категория грунта по СП Soil category according to SP 14.13330.2018	Максимальные ускорения грунта Maximum ground accelera- tions cm/s^2	Диапазон преобладающих периодов Range of dominant pe- riods T сек	Примечания Notes
I	230	0.25÷0.6	Глина твердая Clay hard
II	300	0.10÷0.6	Глина и суглинок полутвёрдый, слоистый Clay and loam semi-solid, layered
III	360	0.10÷0.6	Пески рыхлые Sands are loose
IV	510	0.10÷0.3	Неустойчивые разновидности песчано-глинистых грунтов, указанные в категории III, склонные к разжижению при сейсмических воздействиях Unstable varieties of sandy-argillaceous soils, specified in category III, prone to liquefaction during seismic actions

Ускорения колебания пылеватых водонасыщенных грунтов могут достигать 510-560 cm/s^2 , при этом толщина рыхлого слоя достигает 8-15 м. Такие грунты неустойчивы и при сильном землетрясении могут «сползти», что может привести к значительным деформациям зданий, расположенных на них.

Необходимо учесть, что даже землетрясения средней интенсивности могут привести такие грунты к разжижению, то есть, к потере несущей способности, возникающей в результате разрушения структуры грунта и сопровождаемое постепенным восстановлением его структуры и прочности при снятии динамического воздействия. Ускорения колебаний грунтов I категории достигают 230 cm/s^2 , при толщине слоя 1,5-5 метров имеют достаточно высокие сейсмические свойства. Грунты II категории при ускорении до 300 cm/s^2 при толщине слоя 5-10 м, могут снижать сейсмические свойства вышележащих слоев грунтов и образовывать мелкие трещины.

Глины и суглинки полутвердого и твердого характера являются одними из основных слоев в Республике Дагестан с толщиной несущего слоя до 10 метров. Также было выявлено из табл.4 что в I категории присутствуют, так называемые, сарматские глины с толщиной слоя до 2 метров, которые относятся к тонкослоистым твердым грунтам.

При возникновении сильного землетрясения с магнитудой $M=7$ с эпицентральной расстоянием 40 км от города (односторонний разрыв), максимально возможные ускорения колебания скального грунта составят 230 cm/s^2 с периодами, лежащими в диапазоне 0,1-0,8 сек. Максимально возможные колебания рыхлых грунтов могут достигать 420 cm/s^2 .

На рис. 1 показаны графики зависимости ускорений колебаний грунта на поверхности от колебаний грунта в основании. Видна прямая зависимость толщины рыхлого грунта от максимального воздействия на скальный слой грунта. На графиках (рис. 1 и 2) видно, что при исходном ускорении 230 cm/s^2 , колебания рыхлой толщи 5-ти метровой толщи, представленной суглинками на периодах 0,1-0,3 сек. имеют значения 300-350 cm/s^2 . Ускорения колебаний этих же грунтов при толщине 15 метров достигают значений 440 cm/s^2 на периодах 0,2-0,3 сек. В даль-

нейшем происходит резкое снижение амплитуд ускорений колебаний рыхлой толщи и на периодах 0,5-0,6 сек максимальные ускорения сравниваются с ускорениями скальных грунтов. Диапазон неустойчивых колебаний рыхлых грунтов (песков, супесей, суглинков), лежит в интервале 0,1-0,3 сек. Построенные кривые позволяют с меньшим риском произвести оценку сейсмической опасности площадке строительства и рассчитать надёжность сооружений. Эту информацию в дальнейшем используем для выбора рационального проектного решения здания.

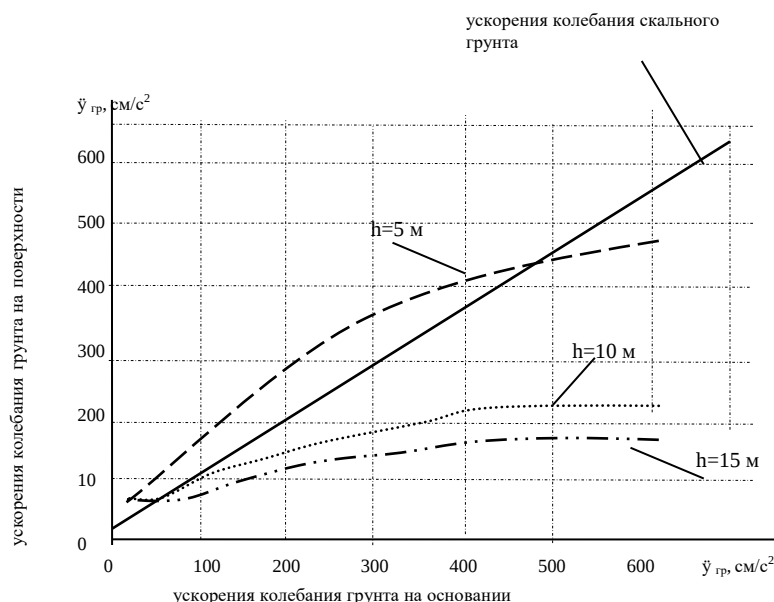


Рис.1. Графики зависимости амплитуд ускорений грунта рыхлого грунта (суглинок) толщиной 5, 10 и 15 м от максимального воздействия на скальный грунт в основании при землетрясении с магнитудой $M=7$

Fig.1. Graphs of the dependence of the amplitudes of accelerations of loose soil (loam) with a thickness of 5, 10 and 15 m on the maximum impact on the rocky soil at the base during an earthquake with a magnitude of $M = 7$

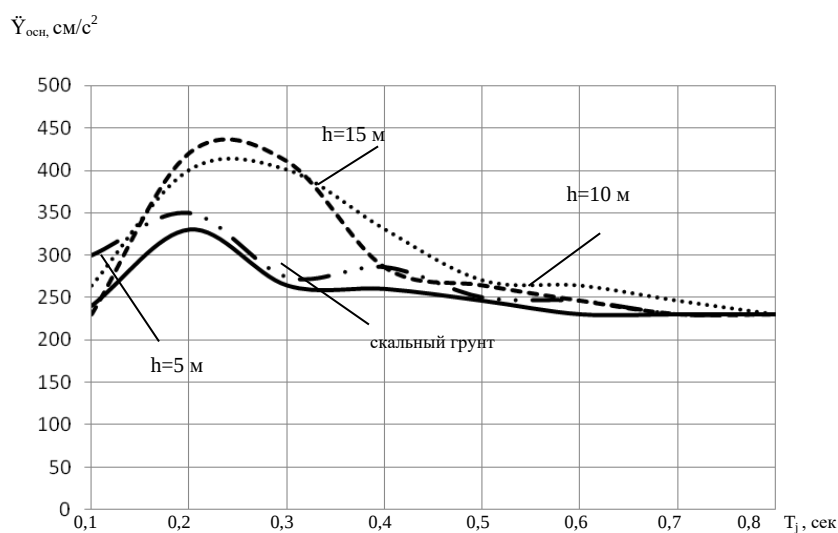


Рис. 2. Зависимость ускорений колебаний грунтов от максимальных ускорений на основании в зависимости от мощности рыхлого слоя при землетрясении с магнитудой $M=7$

Fig. 2. Dependence of the accelerations of ground vibrations on the maximum accelerations on the base depending on the power of the loose layer in an earthquake with a magnitude of $M = 7$

Таблица 4. Максимальные ускорения колебания грунта возможные на территории г. Махачкалы при сильном землетрясении с $M=7$
Table 4. Maximum acceleration of ground vibrations possible on the territory of Makhachkala in case of a strong earthquake, с $M=7$

N п/п	Индекс участка по карте сейсмического микрорайонирования Plot index	Ускорения грунта при магнитуде М=7, Δ=40 Ground accelerations at magnitude см/с²						J	Н (м)	Уровень грунтовых вод Ground water level	V _i (м/с)	Плотность грунтов Soil density ρ _i (кг/м³)	Примечания Notes
		Преобладающая частота колебаний грунта Ground motion frequency T (сек)											
		0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6						
1.	A-1V-3-a	400	330	264	260	246	230	9	7	0-2	214	1.98	Песок мелкий слабовлажный с глубины 2.5 м водонасыщенный
2.	A-1V-3-б	400	330	264	246	230	230	9	6	2-5	207	1.98	
3.	A-1V-4-a	264	400	400	330	270	264	9	13	0-2	214	1.98	
4.	A-1V-4-б	230	440	330	275	264	246	8	10	2-5	207	1.98	
5.	Б-1V-3-a	276	390	300	264	246	230	9	8	0-2	214	1.86	Песок пылеватый, средней плотности, плотный водонасыщенный
6.	Б-1V-3-б	264	370	276	264	246	230	8	8	2-5	207	2.10	
7.	Б-1V-4-a	264	246	560	520	490	380	9	19	0-2	214	1.86	
8.	Б-1V-4-б	264	264	490	490	460	380	8	19	2-5	207	2.10	
9.	Б-V-3-a	255	246	240	230	230	230	8	5	0-2	374	2.03	Элювиальный грунт - глина и суглинок полутвёрдый, слоистый, с присыпками мелкого пылеватого песка
10.	Б-V-3-б	260	250	246	240	230	230	8	6	2-5	374	2.03	
11.	Б-V-3-д	274	246	240	230	230	230	8	8		374	2.03	
12.	Б-V-4-a	284	270	264	246	230	230	8	9	0-2	374	2.03	
13.	Б-V-4-б	290	280	270	264	246	230	8	10	2-5	374	2.03	
14.	В-11-3-д	420	322	264	246	230	230	8	6	-	224	1.94	Глина полутвёрдая реже текучеplastичная
15.	В-111-3-a	430	276	264	246	240	230	8	5	0-2	211	1.99	Суглинок тугопластичный, редко до текуче-го с прослойками мелкого песка
16.	В-111-3-б	264	415	339	264	246	230	8	7	2-5	170	2.05	
17.	В-111-3-д	276	400	322	264	246	230	8	9	-	211	1.99	
18.	В-111-4-a	240	430	322	264	246	230	8	10	0-2	211	1.99	
19.	В-IV-3-a	360	330	264	246	230	230	8	7	0-2	214	1.98	Песок пылеватый плотный и средней плотности, влажный в зоне аэрации, ниже водонасыщенный
20.	В-IV-3-б	345	330	264	246	230	230	8	7	2-5	207	1.98	
21.	В-IV-4-a	450	300	560	490	330	300	8	16	0-2	214	1.98	
22.	В-IV-4-б	430	270	460	400	330	300	8	16	2-5	207	1.98	
23.	В-IV-4-в	430	270	460	400	330	300	8	16	5-10	207	1.98	
24.	В-V-3-a	390	270	246	240	230	230	8	5	0-2	224	2.03	Элювиальный грунт- Глина и суглинок полутвёрдый, слоистый, с присыпками мелкого и пылеватого песка
25.	В-V-3-б	370	320	264	246	230	230	8	7	2-5	224	2.03	
26.	В-V-3-в	264	370	320	300	264	246	8	9	5-10	224	2.03	
27.	В-V-3-д	246	390	330	300	264	246	7	10	-	224	2.03	
28.	В-V-4-a	246	390	330	300	264	246	8	10	0-2	224	2.03	
29.	В-V1-1-a	230	230	230	230	230	230	8	1,5	0-2	224	2.07	Сарматская глина твёрдая и тонкослоистая
30.	В-V1-2-a	230	230	230	230	230	230	8	2	0-2	224	2.07	
31.	В-V1-2-б	390	264	240	230	230	230	8	5	2-5	224	2.07	
32.	В-V1-2-д	230	230	230	230	230	230	7	1,5	-	224	2.07	
33.	Г-111-3-a	400	270	264	240	230	230	8	5	0-2	211	2.05	Суглинок полутвёрдый, слоистый с тонкими прослойками мелкого песка
34.	Г-111-3-б	264	400	400	340	270	260	8	10	2-5	170	2.05	
35.	Г-111-4-a	230	410	360	290	264	240	8	11	0-2	211	2.05	
36.	Г-111-4-б	400	400	460	380	340	270	8	12	2-5	170	2.05	
37.	Г-1V-3-a	410	290	264	240	230	230	9	5	0-2	214	2.07	Песок мелкий, плотный водонасыщенный
38.	Г-1V-3-б	380	330	264	230	230	230	9	7	2-5	214	2.07	
39.	Д-1-4-a	264	390	390	320	270	260	8	13	0-2	220	2.00	Пролувиально-делювиальные отложения глины, суглинки
40.	Д-1-4-б	320	400	400	330	300	264	8	13	2-5	204	1.99	
41.	Д-1-4-в	320	400	400	330	300	264	8	13	5-10	204	1.99	
42.	Д-1-4-г	320	400	400	330	300	264	8	33	>10	204	1.99	

Оптимальное проектное решение. Надёжность зданий зависит от спектральных характеристик землетрясения, которую можно определить через функцию $P(T)$, оцениваемую как вероятность не наступления состояния отказа в течении расчётного срока службы T :

$$P(T) = 1 - P[R] \quad (1)$$

Вероятность отказа

$$P[R] = \sum_j \sum_i P[R_i / \Phi_j] \quad (2)$$

где $P[\cdot]$ – вероятность события в скобках;

R_i – событие, при наступлении отказа i -го вида;

Φ_j – событие, при наступлении j – го землетрясения с соответствующими спектральными параметрами.

Кроме надёжности здания, к критериям влияния на оптимальность принятого проектного решения можно отнести стоимость, архитектурно-эстетические, функциональные и другие показатели. Поэтому выбор оптимального проектного решения будем производить путём оценки последствий принимаемого решения по выше перечисленным критериям. Такая задача соответствует задаче вероятностного программирования [26], общая структура которой включает следующие элементы:

Π – множество площадок строительства;

n – отдельная площадка строительства, $n \in \Pi$;

K – множество проектных решений;

k – отдельное проектное решение, $k \in K$;

I – множество критериев принятия решения;

i – отдельный критерий принятия решения, $i \in I$

Оптимальная функция решения $f(n, k)$ при этом будет соответствовать минимальному общему риску:

$$f(n, k) = \max_{\substack{k \in K \\ n \in \Pi}} \sum_{i=1}^I f_{nki} \quad (3)$$

f_{nki} – нормированная функция прямых или косвенных потерь по критерию i , связанная с выбором n – ой площадки для k -го проектного решения.

Таким образом, задача сводится к поиску минимальной строки матрицы $[f_{nki}]$

Решение задачи (2) связано с выражения обобщенной оценки по каждому решению с учётом всех его последствий. Решим задачу методом системного анализа, предложенного в [27]. Каждому действию f_{nk} присваивается число, которое достаточно полно представляет информацию, содержащуюся в f_{nk} . При этом множество рассматриваемых критериев, разбивается на три класса:

$\Gamma^+(k, k')$ – подмножество критериев, по которым k предпочтительнее k'

$\Gamma(k, k')$ – подмножество критериев, по которым k равноценно k'

$I^-(k, k')$ – подмножество критериев, по которым k' предпочтительнее k

Для каждого из этих подмножеств образуется новый критерий, объединяющий все критерии, вошедшие в данное подмножество, и через три числа $P^+(k, k')$, $P^-(k, k')$, $P^0(k, k')$ представляют относительную важность этих трёх подмножеств. Данную информацию используем для построения оптимального проектного решения.

Представим условия лучшего варианта проектного решения в виде:

$$\frac{P^+(k, k')}{P^-(k, k')} \geq C \quad (4)$$

где C – некоторое положительное число, $C \geq 1$,

Оптимальное решение принимается из условия максимума суммы отношений P_1/P_2 для каждого проектного решения и последовательно по всем площадкам строительства.

$$F(n, k) = \max_{\substack{k \in K \\ k \in \Pi}} \sum \left(\frac{P^+}{P^-} \right) \quad (5)$$

Для принятия оптимального решения необходимо рассчитать надёжность здания, а следующим этапом перевести полученные величины в цифровые значения.

Используя приведённую выше методику, проведём расчёты по определению оптимального конструктивного решения многоэтажного здания для двух площадок строительства при расчётном сейсмическом воздействии с магнитудой $M=7$.

Первая площадка расположена на скальных грунтах, вторая – на песчаных грунтах мощностью 10 м. Для скальных грунтов преобладающие периоды колебаний лежат в диапазоне 0,2-0,8 сек при максимальных ускорениях 230 см/с^2 , а для песков толщиной 10 м, ускорения принимаем (рис. 2) равными 420 см/с^2 , им соответствуют преобладающие периоды колебаний 0,1-0,3 сек.

Рассмотрим 9-ти этажные крупнопанельные здания (рис. 3а) с жёстким конструктивным решением (П) и с гибким 1-м этажом (ПГ) (рис. 3б). Периоды собственных колебаний для здания типа П лежат в диапазоне 0,2-0,3 сек, для зданий типа ПГ-0,8-1 сек.

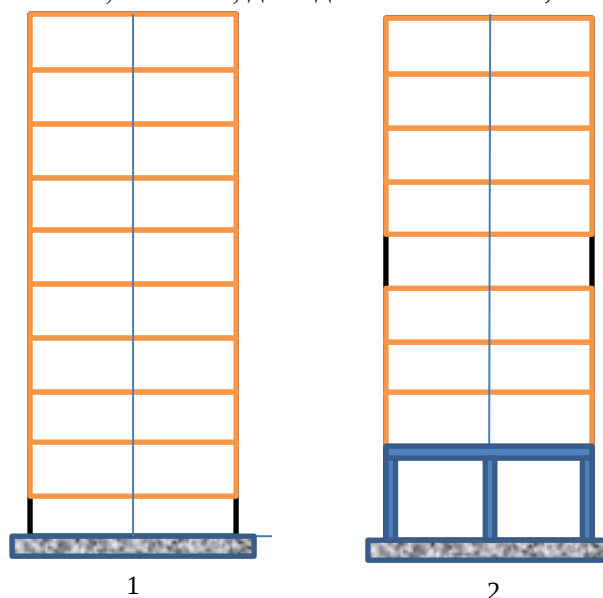


Рис. 3. Схемы конструктивных решений 9-ти этажного здания

1 – крупнопанельное здание с жёстким конструктивным решением

2 – крупнопанельное здание с гибким первым этажом

Fig. 3 Schemes of design solutions of a 9-storey building

1 – large-panel building with a rigid structural solution

2 – large-panel building with flexible ground floor

Предположим, что наиболее важным критерием является надёжность здания, далее следует стоимость, архитектурно-эстетические требования и технологические требования по порядку.

Обозначим надёжность через P_1 , стоимость – P_2 , архитектурно-эстетические требования – P_3 и P_4 – технологические. Следовательно,

$$P_1 > P_2 > P_3 = P_4 \quad (6)$$

Будем считать, что критерии P_3 и P_4 рассмотренные совместно, имеют большую важность, чем критерий стоимости:

$$P_3 + P_4 > P_2 \quad (7)$$

В соответствии с (6) и (7) примем следующие значения приоритетных решений:

$$P_1=7, P_2=5, P_3=3, P_4=3,$$

Далее по рассматриваемым критериям составим шкалы оценок, при этом надёжность и стоимость будут зависеть от характеристик строительной площадки.

Таблица 5. Шкала оценок

Table 5. Rating scale

Критерий Criterion	Конструкция Construction	Шкала оценок для скальных грунтов Rating scale for rocky soils		Шкала оценок для рыхлых грунтов Grading scale for loose soils	
i=1- Надёжность (P_1) Reliability	П	Средняя	HC Medial	Низкая	HH Low
	ПГ	Низкая	HH Low	Средняя	HC Medial
i=2- Стоимость (P_2) Price	П	Средняя	CC Medial	Средняя	CC Medial
	ПГ	Высокая	CB High	Средняя	CC Medial
i=3-Архитектура (P_3) Architecture	П	Низкая	АН Low	Низкая	АН Low
	ПГ	Высокая	AB High	Высокая	AB High
i=4- Технологичность (P_4) Manufacturability	П	Высокая	TB High	Высокая	TB High
	ПГ	Средняя	TC Medial	Средняя	TC Medial

В табл. 5 приведена оценочная шкала для скальных и песчаных грунтов. Надёжность определена с учётом возможных резонансных периодов колебаний, связанных с совпадением собственных колебаний грунтов с периодами колебаний грунтов при сильном землетрясении с магнитудой $M=7$, а также надёжности принятого конструктивного решения здания.

В табл. 6 приведена матрица оценок, соответствующая данным табл. 5.

Таблица 6. Матрица оценок

Table 6. Evaluation matrix

Конструкция Construction	P_1	P_2	P_3	P_4
Скальные грунты Rocky soils				
П	HC	CC	АН	ТВ
ПГ	HH	CB	AB	ТС
Песчаные грунты Sandy soils				
П	HH	CC	АН	ТВ
ПГ	HC	CC	AB	ТС

Согласно формуле (4), найдем отношение $P^+ - P^-$ для каждой пары проектных решений и приведём их в табл. 7, запишем только те, для которых $P^+ / P^- \geq 1$

Таблица 7. Отношение P^+ / P^-

Table 7. P^+ / P^- ratio

k'	k''			
	1	2	3	$\sum P^+ / P^-$
Скальные грунты Rocky soils				
1	-	4	-	4
2	-	-	-	-
Песчаные грунты Sandy soils				
1	-	-	-	-
2	3,33	-	-	3,33

Из табл. 7 следует, что на площадках строительства со скальными грунтами лучше строить панельное здание с жестким конструктивным решением, а на рыхлых грунтах здание с гибким первым этажом.

Обсуждение результатов. С увеличением мощности рыхлого слоя грунта уменьшается его жёсткость, что может привести к значительному увеличению интенсивности землетрясения на поверхности, это показывают и графики на рис. 1. На графиках рис. 2 видно, что акустическая жесткость по верхним 15 метрам осадков различается, чем больше мощность слоя рыхлого грунта, тем меньше средняя жесткость. Амплитуды ускорений начинают насыщаться практически сразу в данном диапазоне исходных воздействий на основание. Амплитуды колебаний грунтов зависят от частотного состава землетрясений. Подтверждением этого являются данные, приведённые в работе [14]. На рис. 3 видно, что зависимость приращения интенсивности за счет резонансов от максимального ускорения на основании для разных значений мощности слоя имеют схожий характер с кривыми коэффициентов усиления в области преобладающего периода [22].

Причем, реакция грунта различается на разных частотных диапазонах. Максимальный отклик получают грунты в диапазоне преобладающих периодов 0,2-0,3 сек. В дальнейшем с увеличением периодов колебаний ускорения падают и на периодах 0,5 - 0,6 сек амплитуды колебаний грунтов, относящихся к разным категориям, по сейсмическим свойствам сравниваются.

Полученные результаты оценки количественных параметров колебаний грунтов использованы для определения надёжности здания, при этом предложенная методика оценки надёжности здания даёт возможность учитывать при расчётах, как конструктивные особенности здания, так и другие параметры.

Вывод. Анализ полученных результатов показал, что с увеличением толщины рыхлого слоя увеличивается величина максимального ускорения, диапазон неустойчивых колебаний периодов при этом лежит в интервале 0,1-0,5 сек. Обработав результаты максимальных ускорений, приведённых в табл. 4, были определены средние значения ускорений для рыхлых грунтов, слагающих территорию г. Махачкалы.

Таким образом, грунты II и III категории по СП 14.13330.2014 «СНиП II-7-81* Строительство в сейсмических районах» могут иметь максимальные ускорения грунтов при возникновении землетрясения с магнитудой $M=7$ до 300 см/с^2 и 360 см/с^2 . Ожидаемые максимальные ускорения средних грунтов при интенсивности 8 баллов, согласно [13], составляют $0.121 \div 0.240 \text{ см/с}^2$.

Оценка надёжности здания с учётом грунтовых условий показала, что существенное значение имеют конструктивные решения здания. Так для условий г. Махачкалы на скальных грунтах лучше строить здания с жестким конструктивным решением, а на грунтах рыхлых здания с гибким первым этажом.

Библиографический список:

1. Отчет о научно-исследовательской работе ФИЦ ЕГС РАН «Исследование параметров сейсмического режима основных сейсмоактивных регионов Северной Евразии», 2016 г., Обнинск. С. 17-28
2. Смирнова М.Н., Бражник В.М., Чуприн В.В., Дадашев С.В., Мамацуев К.А. В кн. Сейсмичность и сейсмоструктура Восточного Предкавказья. Махачкала, 1985 г.
3. 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
4. Шевченко В.И., Гусева Т.В., Лукк А.А., Мишина А.В., Прилепин М.Т., Рейлинджер Р.Э., Хамбургер М.У., Шемпелев А.Г., Юнга С.Л. Современная геодинамика Кавказа (по результатам GPS измерений и сейсмическим данным) // Физика Земли. 1999. № 9. С. 3–18
5. Богданов В.В., Павлов А.В., Полюхова А.Л., «Рекуррентные соотношения расчёта параметров сейсмического режима на основе вероятностной интерпретации закона повторяемости», Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия: Естественные науки, 2012, № 1, 44–48
6. Общий каталог землетрясений на территории Дагестана. Макросейсмические и инструментальные данные о землетрясениях за период VII в.н.э. до 2005 года. Махачкала, «Эпоха», 2007 г
7. Малянова Л.С., Габсатарова И.П. Спектральные и очаговые параметры землетрясений Северного Кавказа // Землетрясения Северной Евразии. – Вып. 22 (2013 г.). – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2019. – С. 311–319

8. Donovan N.C., Bornstein A.E. Uncertainties in Seismic risk procedures// Proc. Amec. Soc. Civil Eng. J. Geotech. Eng. Div. 1978. Vol. 104.P. 869-887
9. Ньмарк Н., Розенблюэт Э. Основы сейсмического строительства: сокр. Пер. с англ. / Под. Ред. Я.М. Айзенберга. М.: Наука, 1980, с. 103
10. Зайнулабидова Х.Р. Параметры колебаний скальных грунтов при землетрясениях различной интенсивности / Известия высших учебных заведений. Строительство. 2019. № 2 (722). С. 110-120.
11. П.И. Крамынин, В.В. Штейнберг Параметры колебаний плотных грунтов. М.: Наука, 1976. с. 23-35. (Вопр. Инж. Сейсм. Вып. 18.)
12. СП 330.1325800.2017 Здания и сооружения в сейсмических районах. Правила проектирования инженерно-сейсмометрических станций
13. Зайнулабидова Х.Р. Влияние региональных характеристик грунтов на сейсмичность территорий. Научный журнал строительства и архитектуры. 2021. № 1 (61). С. 96-107. DOI: 10.36622/VSTU.2021.61.1.009, ИФ=0,607
14. Абакаров А.Д., Зайнулабидова Х.Р. Влияние коэффициента трения-скольжения опорных элементов и параметров сейсмического воздействия на реакцию и надежность сооружений с сейсмозащитой // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. –2021. –No 2. С. 12-23. DOI:10.15593/perm.mech/2021.2.02
15. Abakarov A.D., Zainulabidova H.R. The Influence of the Friction-Sliding Coefficient of Support Structures and Parameters of Seismic Actions on Reactions and Reliability of Structures with Seismic Protection. PNRPU Mechanics Bulletin, 2021, no. 2, pp. 12-23. DOI: 10.15593/perm.mech/2021.2.02
16. Уздин А.М., Смирнова Л.Н., Сорокина Г.В., Абакаров А.Д., Зайнулабидова Х.Р., Прокопович С.В. Статистическое моделирование сейсмических воздействий / Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2019. № 5. С. 19-27.
17. Зайнулабидова Х.Р. Параметры колебаний скальных грунтов при землетрясениях различной интенсивности / Известия высших учебных заведений. Строительство. 2019. № 2 (722). С. 110-120.
18. Zainulabidova K.R. Nonlinear behavior of soils under exposure to seismic activity / Soil Mechanics and Foundation Engineering. 2019. T. 56. № 1. С. 48-53.
19. A.D. Abakov, H.R. Zainulabidova, H.M. Omarov, R.G. Gasanov Computational models of seismic effects taking into account the extent of the seismological information completeness IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 698 (2019) 022004 doi:10.1088/1757-899X/698/2/022004
20. Абакаров А.Д., Гасанов Р.Г. Оценка надежности и живучести систем с учетом взаимосвязи элементов при сейсмическом воздействии. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2019; 46 (2): 118-125.
21. Рутман Ю.Л., Ковалева Н.В., Давыдова Г.В. Определение оптимальных параметров демпфирования в системах сейсмоизоляции // Инженерно-строительный журнал. –2013. – № 5 (40). – С. 107–115.
22. Абакаров А.Д., Зайнулабидова Х.Р. К определению расчетных уровней ускорений сейсмических колебаний грунтов с учетом местных сейсмологических особенностей.// Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений.-2001, №5, с.6-7.
23. Синяцек М.Н. К статистической теории сейсмических спектров.// Строительная механика и расчет сооружений.- 1982, №2, с. 62-65
24. Денисов Б.Е., Кахновский А.М. Методы представления сейсмометрической информации в цифровую форму.// Сейсмостойкое строительство.- М.: ЦНИИСК им. Кучеренко, 1977, №11, с. 18-22.
25. Арар, R. M., and Grossmann, I. E. (2017). Модели и вычислительные стратегии многоступенчатого стохастического программирования в условиях эндогенных и экзогенных неопределенностей. *Вычисл. Chem. Eng.* 103, 233-274. doi:10.1016/j.compchemeng.2016.11.011
26. Мушик Э., Мюллер П. Методы принятия технических решений. – М.: Мир, 1990. – 208 с

References:

1. Report on the research work of the FITC of the USGS RAS "Study of the parameters of the seismic regime of the main seismically active regions of Northern Eurasia", Obninsk. 2016: 17-28 (In Russ)
2. Smirnova M.N., Brazhnik V.M., Chuprin V.V., Dadashev S.V., Mamatsuev K.A. In the book. Seismicity and seismotectonics of the Eastern Caucasus. Makhachkala, 1985 (In Russ)
3. 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
4. Shevchenko V.I., Guseva T.V., Lukk A.A., Mishina V., Prilepin M.T., Reylinger R.E., Hamburger M.U., Shempelev A.G., Junga S.L. Modern geodynamics of the Caucasus (based on GPS measurements and seismic data). *Physics of the Earth*. 1999; 9: 3-18 (In Russ)
5. Bogdanov V.V., Pavlov A.V., Polyukhova A.L., "Recurrent relations of calculation of seismic regime parameters based on probabilistic interpretation of the law of repeatability", [Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Severo-Kavkazskiy region. Seriya: Yestestvennyye nauki] *Izvestia of higher educational institutions. The North Caucasus region. Series: Natural Sciences*, 2012; 1: 44-48 (In Russ)
6. General catalogue of earthquakes in Dagestan. Macroseismic and instrumental data on earthquakes for the period of the VII century A.D. until 2005. Makhachkala, "Epoch", 2007 (In Russ)

7. Malyanova L.S., Gabsatarova I.P. Spectral and focal parameters of earthquakes in the North Caucasus. *Earthquakes of North-ern Eurasia*. 2013; 22: 311-319. Obninsk: FITC EGS RAS, 2019. (In Russ)
8. Donovan N.C., Bornstein A.E. Uncertainties in Seismic risk procedures. *Proc. Amec. Soc. Civil Eng. J. Geotech. Eng. Div.* 1978; 104: 869-887
9. Nymark N., Rosenbluet E. Fundamentals of seismic construction: a short translation from English. Edited by Ya.M. Aizen-berg. M.: Nauka, 1980: 103 engineering sites for the construction of earthquake-resistant buildings in Makhachkala. *Engineer-ing-geological features of the Dagestan ASSR*. Makhachkala. 1984: 256.(In Russ)
10. Zainulabidova H.R. Parameters of vibrations of rocky soils during earthquakes of various intensity. News of higher education-al institutions. [Stroitel'stvo] *Construction*. 2019; 2 (722): 110-120. (In Russ)
11. P.I. Kramynin, V.V. Steinberg Parameters of vibrations of dense soils. M.: [Nauka] *Science*. 1976: 23-35. (Vopr. Eng. 18.) (In Russ)
12. SP 330.1325800.2017 Buildings and structures in seismic areas. Rules for the design of engineering seismometric stations (In Russ)
13. Zainulabidova H.R. Influence of regional characteristics of soils on the seismicity of territories. Scientific Journal of Construc-tion and Architecture. 2021; 1 (61): 96-107. DOI: 10.36622/VSTU.2021.61.1.009, IF=0.607 (In Russ)
14. Abakarov A.D., Zainulabidova H.R. Influence of the friction-slip coefficient of support elements and parameters of seismic impact on the reaction and reliability of structures with seismic protection. [Vestnik Permskogo natsional'nogo issle-dovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Mekhanika] Bulletin of Perm National Research Polytechnic University. Me-chanics. 2021; 2: 12-23. DOI:10.15593/perm.mech/2021.2.02 (In Russ)
15. Abakarov A.D., Zainulabidova H.R. The Influence of the Friction-Sliding Coefficient of Support Structures and Parameters of Seismic Actions on Reactions and Reliability of Structures with Seismic Protection. PNRPU Mechanics Bulletin, 2021; 2: 12-23. DOI: 10.15593/perm.mech/2021.2.02
16. Uzdin A.M., Smirnova L.N., Sorokina G.V., Abakarov A.D., Zainulabidova H.R., Prokopovich S.V. Statistical modeling of seismic impacts. *Earthquake-resistant construction. Safety of structures*. 2019; 5: 19-27. (In Russ)
17. Zainulabidova H.R. Parameters of vibrations of rocky soils during earthquakes of various intensity / News of higher educa-tional institutions. [Stroitel'stvo] *Construction*. 2019; 2 (722): 110-120. (In Russ)
18. Zainulabidova K.R. Nonlinear behavior of soils under exposure to seismic activity. *Soil Mechanics and Foundation Engineer-ing*. 2019; 56(1):. 48-53.
19. A.D. Abakov, H.R. Zainulabidova, H.M. Omarov, R.G. Gasanov Computational models of seismic effects taking into account the extent of the seismological information completeness IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 698 (2019) 022004 doi:10.1088/1757-899X/698/2/022004 (In Russ)
20. Abakarov A.D., Hasanov R.G. Assessment of reliability and survivability of systems taking into account the interrelation of elements under seismic impact.[Vestnik Dagestanskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta. Tekhnicheskiye nauki] *Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences*. 2019; 46 (2): 118-125. (In Russ)
21. Rutman Yu.L., Kovaleva N.V., Davydova G.V. Determination of optimal damping parameters in seismic isolation systems. [Inzhenerno-stroitel'nyy zhurnal] *Engineering and Construction Journal*. 2013; 5 (40): 107-115. (In Russ)
22. Abakarov A.D., Zainulabidova Kh.R. To determine the calculated levels of accelerations of seismic vibrations of soils taking into account local seismological features. *Earthquake-resistant construction. Safety of structures*. 2001; 5: 6-7. (In Russ)
23. Sinyashek M.N. To the statistical theory of seismic spectra. *Construction mechanics and calculation of structures*. 1982; 2: 62-65(In Russ)
24. Denisov B.E., Kakhnovsky A.M. Methods of presenting seismometric information in digital form. *Earthquake-resistant con-struction*. - M.: TSNIISK im. Kucherenko, 1977; 11: 18-22. (In Russ)
25. Apap, R. M., and Grossmann, I. E. (2017). Models and computational strategies of multi-stage stochastic programming in conditions of endogenous and exogenous uncertainties. *Calculation. Chem. Eng.* 103, 233-274. doi:10.1016/j.compchemeng.2016.11.011
26. Mushik E., Muller P. Methods of technical decision-making. M.: [Mir] *World* 1990; 208. (In Russ)

Сведения об авторах:

Зайнулабидова Ханзада Рауповна, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой архитектуры; hanzada1@mail.ru

Гасанов Руслан Гасанович, старший преподаватель кафедры архитектуры; ruslan.gasanovich@mail.ru

Information about the authors:

Hanzada R. Zainulabidova, Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., Head of the Department of Architecture; hanzada1@mail.ru

Ruslan G. Gasanov, Senior Lecturer, Department of Architecture; ruslan.gasanovich@mail.ru

Конфликт интересов/ Conflict of interest.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов/The authors declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию/Received 29.05.2022.

Одобрена после рецензирования Revised 16.06.2022.

Принята в печать/ Accepted for publication 16.06.2022.