

Белаш Т.А., д-р. техн. наук, проф.,
Деменкова М.С., магистр

(Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I» (ФГБОУ ВО ПГУПС), Санкт-Петербург)

СЫПУЧИЕ ПРИРОДНЫЕ МАТЕРИАЛЫ В СИСТЕМАХ СЕЙСМОЗАЩИТЫ ЗДАНИЙ

В сейсмостойком строительстве широко используются природные материалы различного типа, среди которых особое место занимают сыпучие материалы из песка, гравия, щебня и т. п. Использование этого материала позволяет существенно снизить влияние сейсмического воздействия. В статье рассматриваются возможные варианты эффективного применения сыпучих материалов в различных конструкциях сейсмозащиты зданий.

Ключевые слова: сыпучий материал, песок, гравий, сейсмозащита, сейсмоизолирующие фундаменты, надземные конструкции.

Природные материалы получили широкое распространение в сейсмостойком строительстве и были известны еще в глубокой древности. Такие материалы, как природные камни различного происхождения, деревянные конструкции, изделия, изготовленные из глины с добавлением соломы, мякины (сырцовый кирпич), сыпучие материалы и т. п., не раз использовались в строительстве зданий и сооружений и имели самый широкий спектр применения. Среди природных материалов особое место занимают сыпучие материалы, к которым относятся песок различных фракций, гравий, щебень и т. п. За счет нелинейной работы этих материалов удается существенно снизить сейсмические колебания объекта во время землетрясений. Использование сыпучих материалов в системах защиты зданий не требует специальных затрат во время строительства и эксплуатации, что может существенно повлиять на стоимость строящегося объекта. Конструктивные решения с использованием сыпучих материалов отличаются простотой устройства и изготовления, а также стабильностью демпфирующих характеристик. В статье рассматриваются возможные варианты эффективного применения сыпучих материалов в различных конструкциях сейсмозащиты зданий.

Использование сыпучих материалов в качестве природного демпфирующего средства было известно достаточно давно. Так, например, многие культовые сооружения Средней Азии и Средиземноморья возводились на специально устраиваемых в фундаментной части песчано-щебнистых прокладках, выполняющих роль элементов сейсмоизоляции,

которые засыпались не только под стены зданий, но и под деревянные колонны, например, в Кносском дворце (VI в. до н. э.). Такая подушка равномерно распределяла нагрузку от фундамента, снижая силу подземных толчков. В Древнем Египте также устраивались песчаные прокладки между фундаментом и грунтом, например, в Храме Рамзеса IV в Дер эль-Бахри, которые равномерно передавали нагрузку от надземных конструкций на основание, не вызывая появления неравномерных осадок и концентраций напряжений. С другой стороны, данная система сейсмоизоляции снижала сейсмические силы, действующие со стороны грунта, и позволяла зданию проскальзывать по песку относительно грунта в период землетрясения. В конце III в. до н. э. — XVII в. до н. э. во время Среднего царства основание колонн устраивали на песчаных подушках толщиной до 80 см. Со временем большое внимание стало уделяться непосредственно самой конструкции фундамента, например, фундаменты под колонны в первом дворе Большого Храма Амона Тахарки проектировались из трех слоев каменной кладки толщиной до 30 см каждый, разделенных песчаными подушками толщиной 10-20 см. Для повышения сейсмоизоляции под фундаментом дополнительно устраивалась песчаная подушка толщиной 1 м, а для создания эффекта обоймы весь слоистый фундамент окружался кирпично-сырцовой стеной. Далее в период Нового царства (XVI-XI вв. до н. э.) в строительстве стал применяться новый строительный материал — песчаник, как более долговечный и прочный [1].

В Пантикапее в городе Керчь устраивались фундаменты из слоя глины, не обработанных камней средних размеров и слоя мелких камней, далее по ним устанавливались фундаментные блоки. Такой тип конструкции предполагал равномерное распределение нагрузки на основание, а также снижение сейсмических ударов в период землетрясения за счет проскальзывания здания по слою глины (рисунок 1) [1].

В Оливии, расположенной в северо-западной части Причерноморья, в качестве фундаментов под стены применялись слоистые субструкции искусственного солончака, образовавшегося в результате пропитки глины солью, содержащейся в золе [1].

В Древнем Риме при строительстве Колизея конструкции стен представляли собой систему из скользящих поясов слоистой конструкции из облицовочных каменных блоков, известково-песчаного раствора и слоя мелкого щебня. Вся эта конструкция уплотнялась, затем наносилась каменная крошка с пылью. В итоге, полученные слоистые стены при сейсмическом воздействии могли проскальзывать друг относительно друга



Рисунок 1 —
Сейсмоизоляция
храма, Пантикапей,
и сейсмоизоляция
фундаментных блоков

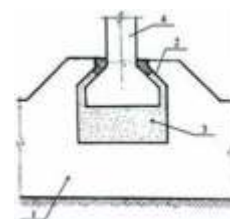


Рисунок 2 —
Сейсмоизолятор зданий

независимо, уменьшая движение, передаваемое от землетрясения [1].

В Средней Азии основными строительными материалами растворов-являлись ганч крупного помола, который смешивался с лессом, песком, древесным углем, золой, шерешем (порошком из высушенных и размолотых корней растений), и глина. Лессовый раствор под фундаментом представлял собой скользящий пояс, снижающий сейсмические движения [1].

Таким образом, принятые конструктивные решения позволили обеспечить сейсмостойкость многих памятников архитектуры, сохранившихся до наших дней.

В настоящее время варианты расположения сыпучих прокладок в фундаментах могут быть различны. Так, в сейсмоизоляторе зданий, состоящем из железобетонного фундамента в виде железобетонной плиты с бортами, устраивались специальные квадратные или прямоугольные углубления, в которые засыпался гранитный песок высотой 1 м (рисунок 2) [2].

Такой сейсмоизолятор снижает горизонтальные и вертикальные колебания благодаря особым свойствам гранитного песка (прочность на сжатие более 40 МПа, F200, W4). Гранитный песок обладает рядом преимуществ: устойчив к истиранию и воздействию агрессивных сред, хорошо воспринимает нагрузку и рассеивает напряжение в основании [2].

Сыпучий материал, используемый в качестве демпфирующего слоя, может быть использован в сейсмостойком здании, где фундаментная плита подвешивается на жестких тягах. В дне фундаментного стакана устраивается прослойка из сыпучего материала и специальные датчики, измеряющие вертикальное давление здания. При действии горизонтальной нагрузки между подошвой фундаментной плиты и прослойкой возникают силы трения, регулируя которые можно снизить сейсмическое воздействие на сооружение (рисунок 3) [3].

Также в области сейсмостойкого строительства малоэтажных зданий при расчетной сейсмичности 7 и более баллов, используется фундамент, представленный на рисунке 4 [4].

Такой вид фундамента состоит из верхней и нижней частей, разделенных горизонтальным швом из торообразных емкостей с вырезами на внутренних поверхностях, края

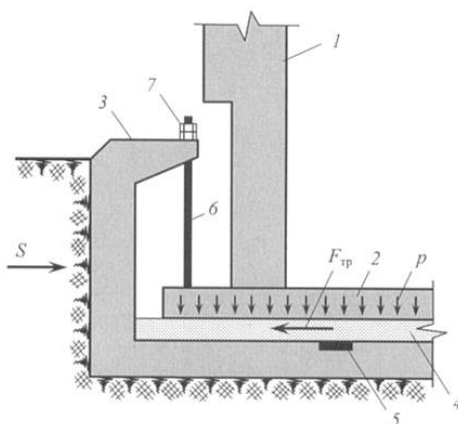


Рисунок 3 — Фундаментная плита с прослойкой демпфирующего материала

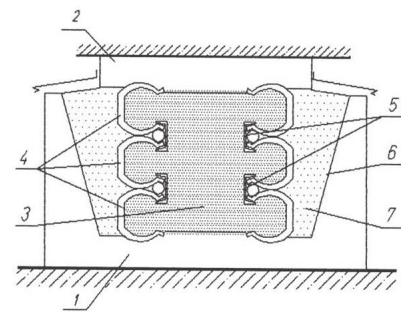


Рисунок 4 — Фундамент для сейсмостойкого здания

которых скреплены кольцевым бандажом. Этот шов заполняется уплотненным сыпучим материалом, а между емкостями и внутренней поверхностью стакана фундамента засыпается неуплотненный сыпучий материал. Применение данной конструкции предполагает снижение сейсмического воздействия, металлоемкости зданий и повышение их надежности [4].

Для сейсмоизоляции зданий также известно изобретение, представленное на рисунке 5 [5].

Для снижения колебаний на здании от сейсмического воздействия разрабатывается котлован, дно которого посыпается слоем грунта мелкой песчаной фракции, далее устраивается дренажная система. Уклон дна к дренажным канавкам составляет 0,005-0,001. Затем насыпается подушка из дренирующего материала с размерами фракции 10-70мм, устанавливаются сверху фундаментные блоки с сейсмопоясами, засыпаются пазухи из того же материала, что и по-

душка сейсмоизоляции.

В основе данной системы лежит принцип демпфирования за счет проскальзывания по подушке фундаментных блоков, что резко увеличивает диссипацию энергии и ограничивает амплитуды смещения (скоростей, ускорений) колебания и сокращает продолжительность интенсивных колебаний по сравнению с той, которая была бы при отсутствии демпфирующей подушки. В результате использования данного способа сейсмоизоляции снижаются материальные затраты и повышается сейсмостойкость здания [5].

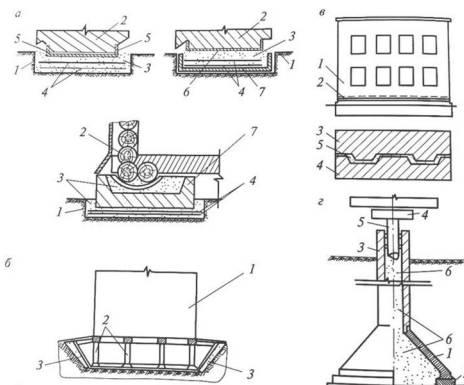


Рисунок 6 — Примеры использования сыпучих материалов в конструкциях фундаментов для снижения сейсмических колебаний:

- а) конструкция фундамента А.Е. Лаврушко: 1 – выемка в скалистом грунте; 2 – верхняя конструкция здания; 3 – промасленный однородный песок или металлическая дробь; 4 – плоские или волнистые металлические листы (горизонтальная связь); 5 – металлические связи, закладываемые в верхние конструкции здания; 6 – жесткая коробка; 7 – желоб.
- б) конструкция фундамента Ю.Г. Чернышева: 1 – надземная часть здания; 2 – опорные стойки; 3 – обратная засыпка.
- в) конструкции фундамента Л.Н. Бобакова: 1 – здание; 2 – горизонтальный шов; 3 – верхний элемент фундамента; 4 – нижний элемент фундамента; 5 – песок.
- г) конструкция фундамента В.И. Карелина: 1 – полая коническая оболочка; 2 – опорное кольцо; 3 – полая стойка; 4 – оголовок стойки; 5 – поршень стойки; 6 – сыпучий материал (песок)

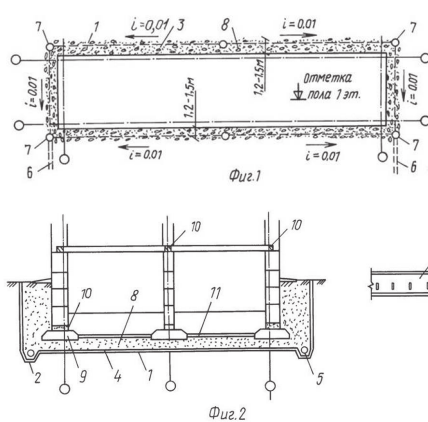


Рисунок 5 — Способ сейсмоизоляции фундаментов зданий и сооружений

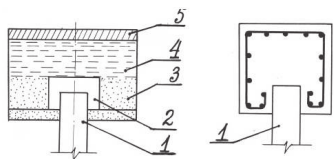


Рисунок 7 – Конструкция фундамента аудиторного корпуса университета в г. Консепсионе (Чили):

1 – свая; 2 – оголовок сваи; 3 – слой песка; 4 – щебеночная подушка; 5 – бетонная плита

Другие примеры использования сыпучих материалов в конструкциях сейсмоизолирующих фундаментов показаны на рисунке 6, а, б, в, г [6] — [9].

В практике строительства широко распространение получили такие решения конструкций фундаментов, в которых подушка из сыпучего материала располагается между свайным фундаментом и монолитной бетонной плитой (рисунок 7) [10].

Сейсмические колебания фундамента здания на таких опорах оказываются сниженными вследствие проявления нелинейной упругости песка и значительного поглощения энергии в его слое. Конструкции фундаментов с сыпучими подушками были применены во многих регионах со сложными инженерно-геологическими условиями.

Другим примером реализации демпфирующих свойств сыпучих материалов является специально создаваемая конструкция демпфера сухого трения, установленная в сейсмоизолирующем фундаменте, в которой элемент сухого трения выполнен в виде железобетонной плиты на сыпучем слое из гравийно-щебеночного материала (рисунок 8) [11]. Исследования, представленные в работе [12], показали, что такой демпфер обладает вы-

сокими и стабильными характеристиками во времени.

Использование предлагаемой трущейся пары позволяет обеспечить плавность переключений при его нагружении и разгрузке и исключает влияние высших форм колебаний, которые могут быть причиной увеличения ускорений в надземных конструкциях здания.

Все вышеприведенные примеры предполагают использование сыпучих прокладок в основном либо в фундаментной части здания, либо непосредственно под фундаментом, однако они могут так же успешно применяться и в надземных конструкциях зданий. Как показали исследования, представленные в работах [12], [13], применение в качестве трущейся пары поверхностей железобетонных конструкций может быть также весьма эффективным.

На кафедре «Здания» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I ведутся разработки конструктивных решений размещения демпфирующих элементов с использованием сыпучих материалов в конструкциях зданий, некоторые примеры из которых представлены на рисунке 9, а, б [14], [15].

На рисунке, 9а [14] показано устройство, состоящее из отдельных секций с гибкими каркасами, соединенных между собой на уровне междуэтажных перекрытий шарнирными связями. Между секциями устроены деформационные швы, которые по высоте заполняются сыпучим материалом. При дей-

ствии горизонтальной сейсмической нагрузки происходят деформации изгиба или сдвига объемных секций, что вызывает перемещение сыпучего материала и, следовательно, возникновение сил сухого трения, которые обеспечивают диссипацию колебаний.

В другом варианте конструкции демпфера (рисунок 9б) [15] интенсивность колебаний снижается за счет возникновения сил сопротивления во время перемещения штока в цилиндре, заполненного сыпучим природным материалом.

Для оценки эффективности предлагаемых конструкций были выполнены расчетно-теоретические исследования с использованием различных расчетных моделей. Полученные предварительные результаты показали, что использование сыпучего материала природного происхождения в качестве элемента гашения сейсмических колебаний в надземных конструкциях может рассматриваться как весьма эффективное средство сейсмозащиты.

Библиография

1. Кириков Б.Н. Сейсмостойкость древних сооружений./Отв. ред. Я.М. Айзенберг; РАН, Междувед. совет по сейсмологии и сейсмостойк. стр-ву. — М.: Наука. 1992. 136 с.

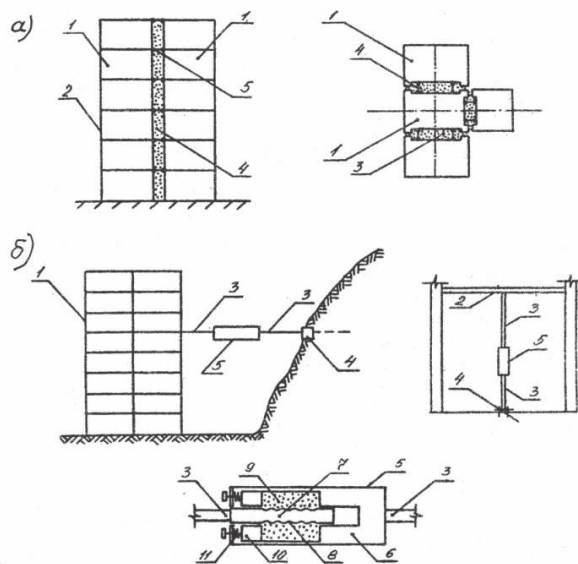


Рисунок 9 — Варианты размещения энергопоглотителей сухого трения:

а) сейсмостойкое многоэтажное здание: 1 — сооружение из объемных секций; 2 — гибкий каркас; 3 — деформационный шов; 4 — песчаный грунт; 5 — шарнирные связи; б) устройство уменьшения колебаний сооружения: 1 — сооружение; 2 — отдельные конструктивные части сооружения; 3 — составная опора; 4 — жесткое основание; 5 — энергопоглотитель; 6 — корпус энергопоглотителя; 7 — шток; 8 — канавки; 9 — сыпучий фрикционный материал; 10 — подвижная шайба с прижимным устройством 11

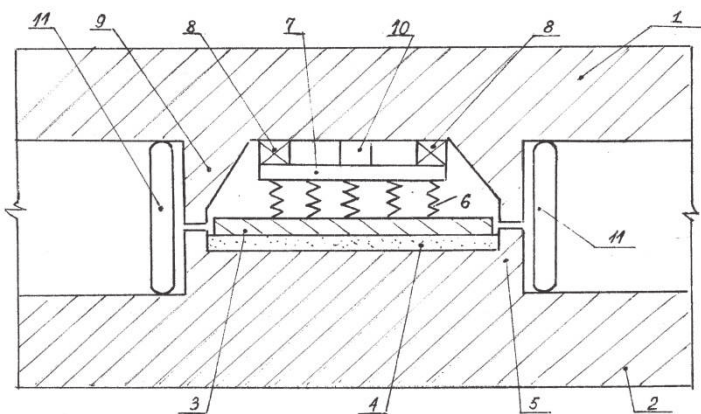


Рисунок 8 – Конструктивная схема энергопоглотителя сухого трения

2. Пойманов В.И. Сейсмоизолятор зданий. Изобретение к патенту RU 2407865 E04B1/98, E02D27/34, опублик. 27.12.2010 в Бюл. № 36.
3. Пеньковский Г.Ф., Сахаров И.И., Ершов А.В. Сейсмостойкое здание. Изобретение к патенту RU 2383704 E04H 9/02, E02D 27/34, опублик. 10.03.2010 в Бюл. № 7.
4. Безруков Ю.И., Безруков О.Ю. Фундамент для сейсмостойкого здания. Изобретение к патенту RU 2119012 E02D 27/34, опублик. 20.09.1998.
5. Пышкин Б.А., Борисов Е.К., Федоров В.И. Способ сейсмоизоляции фундаментов зданий и сооружений. Изобретение к патенту RU 2081246, E02D 27/34, Заяв. 16.08.1991, опублик. 10.06.97.
6. Бобаков Л.Н. А. с. 525780 [СССР]. Фундамент для сейсмостойкого здания. Заяв. 26.08.74 (21) 2055481/33. Опублик. 25.08.76 в Б. И. №1. МКИ E02d 27/34. УДК 624.159.14 (088.8).
7. Карелин В.И. А. с. 700602 [СССР]. Заяв. 26.06.78. Опублик. 30.11.78 в Б. И. № 44. МКИ E02d 27/34. УДК 624.159.14 (088.8).
8. Лаврушко А.Е. Фундамент сейсмостойких строений на искусственном основании. А. с. №32392. Заяв. 1.02.1928, заявл. свид. №23207. Опублик. 30.09.1933.
9. Чернышев Ю.Г. А. с. 1011844 [СССР]. Сейсмостойкое здание. Заявл. 29.12.81, опублик. 15.04.83 в Б.И. МКИ E02d 2734, УДК 624.159.14 (088.8).
10. Современное состояние теории сейсмостойкости и сейсмостойкие сооружения (по материалам IV Международной конференции по сейсмостойкому строительству)./Под общ. Ред. С. В. Полякова. — М.: Стройиздат. 1973. 280 с.
11. Савинов О.А., Сандович Т.А. и др. А. с. 855160 [СССР]. Фундамент сейсмостойкого здания. ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева, Заявл. 28.06.79, №2785872/29-33, опублик. в Б.И. 1981, №30. МКИ E04H 9/02. УДК 624.159.
12. Белаиш Т.А. Нетрадиционные способы сейсмозащиты транспортных зданий и сооружений: монография. — М.: ФГБУ ДПО «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте». 2017. 175 с.
13. Белаиш Т.А., Альберт И.У., Мсаллам Маджет. Эффективные энергопоглопители сухого трения в конструкциях гибких зданий и сооружений. // Сейсмостойкое строительство. 1998. № 1.
14. Лапин С.К., Сандович Т.А., Мсаллам Маджет. Высотное сейсмостойкое здание «ЛАСАМ». Патент RU 2083784 E04H 9/02, E04B 1/348, опублик. 10.07.97 в Б. И. № 19.
15. Лапин С.К., Сандович Т.А., Мсаллам Маджет. Устройство для уменьшения колебаний сооружений. Полезная модель RU 5418 E04G 23/04, опублик. 16.11.97 в Б. И. № 11.

eng

Belash T.A., Demenkova M.S.

BULK NATURAL MATERIALS IN THE SYSTEMS OF SEISMIC PROTECTION OF BUILDINGS

In earthquake engineering natural materials of various types are widely used among which a special place occupy loose materials of sand, gravel, rubble, etc. Using this material can significantly reduce the impact the seismic impact. This article discusses options for the effective use of bulk materials in various designs of seismic protection of buildings.

Key words: bulk material, sand, gravel, seismic protection, seismoisolating foundations, elevated design.

References

1. Kirikov B. N. Sejsmostojkost» drevnih sooruzhenij./Otv. red. YA. M. Ajzenberg; RAN, Mezhdved. sovet po sejsmologii i sejsmostojk. str-vu. — М.: Nauka. 1992. 136 p. (in Russian)
2. Pojmanov V.I. Sejsmoizolyator zdaniij. Izobrenenie k patentu RU 2407865 E04B1/98, E02D27/34, opubl. 27.12.2010 v Byul. №36. (in Russian)
3. Pen»kovskij G. F., Saharov I., I.Ershov A. V. Sejsmostojkoe zdanie. Izobrenenie k patentu RU 2383704 E04H 9/02, E02D 27/34, opubl. 10.03.2010 v Byul. № 7. (in Russian)
4. Bezrukov YU. I., Bezrukov O. YU. Fundament dlya sejsmostojkogo zdaniya. Izobrenenie k patentu RU 2119012 E02D 27/34, opubl. 20.09.1998. (in Russian)
5. Pyshkin B.A., Borisov E.K., Fedorov VI. Sposob sejsmoizolyacii fundamentov zdaniij i sooruzhenij. Izobrenenie k patentu RU 2081246, E02D 27/34, Zayav. 16.08.1991, opubl. 10.06.97. (in Russian)
6. Bobakov LN. A. s. 525780 [SSSR]. Fundament dlya sejsmostojkogo zdaniya. Zayav. 26.08.74 (21) 2055481/33. Opubl. 25.08.76 v B. I. №31. MKI E02d 27/34. UDK 624.159.14 (088.8). (in Russian)
7. Karelin VI. A. s. 700602 [SSSR]. Zayav. 26.06.78. Opubl. 30.11.78 v B. I. №44. MKI E02d 27/34. UDK 624.159.14 (088.8). (in Russian)
8. Lavrushko A.E. Fundament sejsmostojkih stroenij na iskusstvennom osnovanii. A. s. №32392. Zayav. 1.02.1928, zayavl. свид. №23207. Opubl. 30.09.1933. (in Russian)
9. CHernyshev YU. G. A. s. 1011844 [SSSR]. Sejsmostojkoe zdanie. Zayavl. 29.12.81, opubl. 15.04.83 v B.I. MKI E02d 27/34, UDK 624.159.14 (088.8). (in Russian)
10. Sovremennoe sostoyanie teorii sejsmostojkosti i sejsmostojkie sooruzheniya (po materialam IV Mezhdunarodnoj konferencii po sejsmostojkomu stroitel»stvu)./Pod obshch. Red.S. V. Polyakova. — М.: Strojizdat. 1973. 280 p. (in Russian)
11. Savinov O.A., Sandovich T.A. i dr. A. s. 855160 [SSSR]. Fundament sejsmostojkogo zdaniya. VNIIG im. B.E. Vedeneeva, Zayavl. 28.06.79, №2785872/29-33, opubl. v B. I. 1981, №30. MKI E04H 9/02. UDK 624.159. (in Russian)
12. Belash TA. Netradicionnye sposoby sejsmozashchity transportnyh zdaniij i sooru zhenij: monografiya. — М.: FGBU DPO «Uchebno-metodicheskij centr po obrazovaniiyu na zheleznodorozhnom transporte». 2017. 175 p. (in Russian)
13. Belash TA., Al»bert I. U., Msallam Madzhet. EHffektivnye ehnergopoglotiteli suhogo treniya v konstrukciyah gibkih zdaniij i sooruzhenij. // Sejsmostojkoe stroitel»stvo. 1998. № 1. (in Russian)
14. Lapin SK., Sandovich TA., Msallam Madzhet. Vysotnoe sejsmostojkoe zdanie «LAsAM». Patent RU 2083784 E04H 9/02, E04V 1/348, opubl. 10.07.97 v B. I. №19. (in Russian)
15. Lapin SK., Sandovich TA., Msallam Madzhet. Ustrojstvo dlya umen»sheniya kolebanij sooruzhenij. Poleznaya model» RU 5418 E04G 23/04, opubl. 16.11.97 v B. I. №11. (in Russian)