

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ГЕОТЕХНИЧЕСКОЙ СЕЙСМОИЗОЛЯЦИИ ЗДАНИЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ ДЕМПФИРУЮЩИХ ОСНОВАНИЙ

Абиева Г.С., кандидат технических наук

g.abieva@mok.kz, <https://orcid.org/0000-0002-0101-2252>

Ниетбай С.Е., PhD

s.nietbay@kazgasa.kz, <https://orcid.org/0000-0002-9748-6830>

Зхруллаев И.С., магистрант 1го курса по ОП – 7М07321 Строительство (научно-педагогическое направление) Ilyar.2003@icloud.com, <https://orcid.org/0009-0003-1343-836X>

Международная образовательная корпорация, г. Алматы, Казахстан

Аннотация. В статье представлен комплексный обзор и аналитическое обобщение современных исследований в области геотехнической сейсмоизоляции зданий (GSI), направленных на повышение сейсмостойкости сооружений за счёт изменения динамических свойств основания. Рассмотрены результаты более пятнадцати экспериментальных и численных работ 2022–2024 гг., выполненных в ведущих научных центрах и опубликованных в международных журналах *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, *Engineering Structures*, *Tunnelling and Underground Space Technology* и др. Проведён сравнительный анализ эффективности различных типов демпфирующих оснований: песчано-резиновых (RSM), гравийно-резиновых (GRM), из переработанных шин (TDA), полимерных прослоек (EPS) и композитных материалов (AR-GFRC, полиуретан). Показано, что внедрение таких оснований снижает пиковые ускорения на 40–75 %, увеличивает период собственных колебаний зданий в 1,5–2 раза и уменьшает изгибающие и срезающие усилия в элементах конструкций до 70 %. Установлено, что эффективность GSI зависит от инженерно-геологических условий, плотности и толщины демпфирующего слоя, а также параметров волнового распространения в грунте. Наиболее энергоёмкими решениями признаны TDA- и GRM-системы, обеспечивающие оптимальное сочетание прочности и вязкоупругих свойств. Применение композитных и гибридных технологий открывает перспективы адаптивной модернизации фундаментов без капитальных работ. Результаты исследования подтверждают, что GSI является перспективным направлением «зелёного» и сейсмоустойчивого строительства, обеспечивающим повышение безопасности, долговечности и устойчивости зданий при рациональных экономических затратах.

Ключевые слова: сейсмостойкость зданий, демпфирующие основания, взаимодействие здание-грунт.

Введение. Сейсмическая устойчивость зданий остаётся одной из ключевых проблем современной строительной науки. В условиях активной тектоники и высокой плотности застройки традиционные методы усиления конструкций — увеличение массы, армирование, повышение жёсткости — часто приводят к противоположному эффекту: росту инерционных нагрузок и более сильной передаче энергии от грунта к надземной части сооружения.

На смену этим подходам приходит концепция геотехнической сейсмоизоляции (GSI) — создания слоя в основании здания, который изменяет динамические свойства системы «грунт–фундамент–здание». В отличие от механических изолаторов, GSI воздействует на уровне грунта, изменяя путь и форму распространения сейсмических волн, частично их рассеивая и поглощая. Фундаментальные принципы этого подхода отражены в нормативных документах, прежде всего в китайском стандарте GB 50011-2010 “Code for Seismic Design of Buildings” [1], где введена классификация площадок по типу грунта и их динамическим параметрам. Именно этот стандарт стал методологической основой большинства современных исследований в области GSI.

Современные работы [2–10] подтверждают, что эффективность демпфирующих оснований зависит не только от их состава, но и от инженерно-геологических характеристик площадки: плотности, пористости, коэффициента затухания, водонасыщенности и скорости

распространения сейсмических волн. Таким образом, оптимизация GSI требует комплексного анализа – как материалов, так и параметров среды, в которую они внедряются.

Обзор современных исследований. В 2022-2024 гг. в научных журналах Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Engineering Structures и Tunnelling and Underground Space Technology опубликованы ключевые работы, посвящённые развитию GSI.

Исследования на основе RSM подтвердили, что добавление резиновой крошки в песок (20-30 %) увеличивает коэффициент демпфирования с 0,03 до 0,10–0,12, снижая ускорения на 40-70 % [2]. GRM-композиции обеспечивают равновесие между несущей способностью и вязкоупругостью, снижая динамический отклик на 50–60 % при минимальных остаточных осадках [3]. Щебень из переработанных шин (TDA) проявляет наивысшую энергоёмкость, обеспечивая до 75 % снижения ускорений и устойчивость к циклическим деформациям [4-5].

Слоёные прокладки LBSTP рассматриваются как эффективное малобюджетное решение для малоэтажного строительства, обеспечивая снижение ускорений до 64 % [6].

Песчаные подушки и вспененный полистирол (EPS) снижают высокочастотные воздействия на 25–50 %, особенно при работе с подпорными стенами и лёгкими сооружениями [7-8]. Новые материалы – щёлочестойкий стекловолокнистый бетон (AR-GFRC) и полиуретановые инъекции – демонстрируют возможность управлять жёсткостью основания без капитальных работ, уменьшая отклик на 30–50 % [9-10].

Дополнительные исследования [11-15] уточнили закономерности взаимодействия между грунтом и демпфирующими материалами. Численное моделирование показало, что оптимальная толщина слоя (0,8-1,0 м) обеспечивает равномерное распределение энергии и снижение ускорений до 65 %.

Анализ циклических воздействий подтвердил, что RSM и GRM сохраняют демпфирующие свойства даже при длительных колебаниях, а округлая форма частиц способствует более равномерному перераспределению напряжений [11-13]. Трёхмерные симуляции подтвердили эффективность TDA-слоёв при плотности 1,2-1,4 т/м³, обеспечивающей до 70% снижения пиковых ускорений [14].

Полевые наблюдения продемонстрировали практическую надёжность полиуретановых композитных слоёв, способных стабилизировать основание без значительных земляных работ [15].

Таким образом, мировой научный опыт охватывает широкий спектр решений: от простых смесей вторичных материалов до интеллектуальных композитных систем. Далее рассмотрены особенности каждого из этих направлений.

Основные методы геотехнической сейсмоизоляции. Смеси песка и резины (RSM)

RSM – наиболее доступная форма GSI. При содержании резины 25–30 % коэффициент демпфирования увеличивается в 3 раза, а ускорения на уровне фундамента снижаются на 60-70 % [2]. Толщина слоя 0,5-0,8 м считается оптимальной для зданий высотой до 10 этажей. RSM эффективно перераспределяет энергию волнового воздействия, особенно в диапазоне 2-5 Гц, характерном для грунтов средней плотности (Рисунок 1).



Рисунок 1 – Смесь резиновой крошки и песка

Смеси гравия и резины (GRM)

GRM обладают более высокой несущей способностью по сравнению с RSM. Плотная структура гравийного скелета сохраняет устойчивость к осадкам, а резиновая компонента обеспечивает демпфирование. Испытания показали снижение пиковых ускорений на 50–60 %, а период собственных колебаний увеличивается в 1,5 раза [3]. GRM подходят для фундаментов зданий средней этажности и промышленных сооружений (Рисунок 2).



Рисунок 2 – Смесь резиновой крошки и гравия

Щебень из переработанных шин (TDA). TDA характеризуется низкой плотностью (~900 кг/м³) и высокой упругостью. Моделирование показало, что слой TDA толщиной 0,8–1,2 м снижает изгибающие моменты в фундаментах до 65 % и срезающие усилия до 75 % [4–5]. Материал устойчив к циклическим воздействиям и не теряет свойств после многократных сейсмических циклов. TDA рекомендуется для тоннелей, мостов и тяжёлых промышленных объектов (Рисунок 3).



Рисунок 3 – Щебень из переработанных шин

Слоёные прокладки из шин (LBSTP)

LBSTP – простое и эффективное решение для малобюджетного строительства. Прокладки из переработанных шин увеличивают период колебаний с 0,4 до 1,6 с и снижают ускорения до 64 % [6]. Несмотря на ограниченную несущую способность, этот метод имеет высокий потенциал в малоэтажных зданиях и сельской инфраструктуре (Рисунок 4).

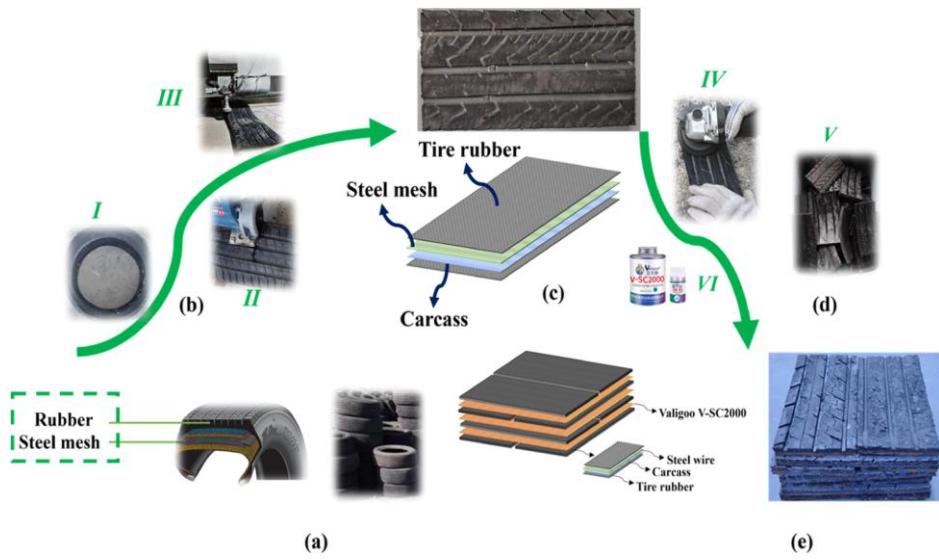


Рисунок 4 – Процесс изготовления LBSTP:(а) изношенная автомобильная шина; (б) отрезка коронной части (протектора); (с) минимальный элемент (компонент); (д) шлифовка и очистка; (е) готовая LBSTP-прокладка

Песчаные подушки. Песчаные подушки гасят высокочастотные колебания, снижая амплитуды на 20–45 % [7]. Эффект усиливается при сочетании с влагосодержащим песком, который повышает коэффициент внутреннего трения (Рисунок 5).



Рисунок 5 – Песчаные подушки

EPS-вставки. Вспененный полистирол (EPS) используется для снижения давления и деформаций подпорных стен, уменьшая смещения до 50 % [8]. Однако долговечность EPS ограничена из-за чувствительности к влаге и УФ-излучению (Рисунок 6).

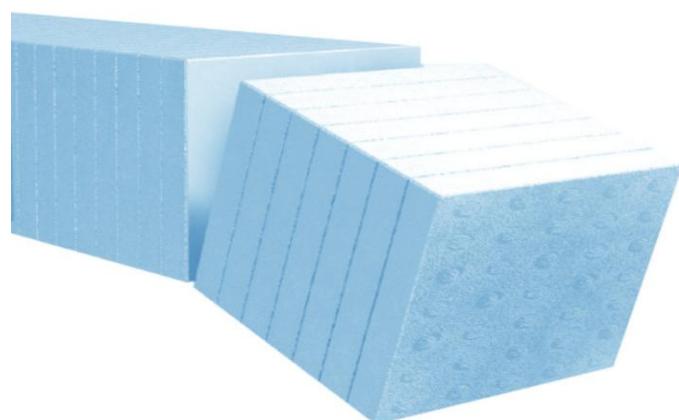


Рисунок 6 – Пенополистирольные вставки

Композитные материалы (AR-GFRC, полиуретан). Современные методы включают модификацию оснований композитами и полимерами. AR-GFRC улучшает трещиностойкость бетонных оболочек и повышает энергоёмкость конструкции [9]. Полиуретановые инъекции, напротив, изменяют динамические параметры грунта *in situ*, снижая спектральные ускорения до 50 % без вскрытия фундамента (Рисунок 7) [10,15].



Рисунок 7 – Последовательность изготовления щёлочестойкого стекловолокнистого бетона (AR-GFRC)

Методы цифрового моделирования и оптимизации параметров слоя. В последние годы активно развиваются методы трёхмерного численного моделирования, позволяющие точно оценивать влияние толщины, плотности и состава демпфирующих слоёв [11-14]. Исследования показали, что оптимальная толщина слоя в пределах 0,8-1,0 м и модуль упругости не выше 50 МПа обеспечивают снижение ускорений до 65 %. Кроме того, моделирование циклических нагрузок подтвердило, что RSM и GRM сохраняют свои демпфирующие свойства даже при длительных колебаниях. Анализ геометрии частиц показал, что округлая форма резиновых включений способствует равномерному распределению напряжений и снижению остаточных деформаций [13].

Влияние грунтовых условий. Грунтовые условия – ключевой фактор, определяющий эффективность GSI. Согласно стандарту GB 50011-2010 [1], выделяются четыре класса площадок:

Таблица 1 – Классификация

Класс площадки	Характеристика грунта	Средняя скорость Vs30, м/с	Эффективность демпфирования
I	Скалистые, плотные породы	>800	65–70 %
II	Плотные пески, гравий	360–800	50–65 %
III	Суглинки, слабые глины	180–360	35–50 %
IV	Водонасыщенные и органические грунты	<180	20–40 %

Для грунтов I–II классов GSI обеспечивает наиболее стабильное снижение ускорений, поскольку сейсмические волны распространяются с меньшими потерями, а демпфирующий слой работает как фильтр. На мягких грунтах III–IV классов эффективность снижается из-за двойного демпфирования и роста осадок.

Исследования [2–5] показывают, что при высокой водонасыщенности эффективность RSM и GRM падает на 10–15 %, тогда как TDA сохраняет свойства благодаря гидрофобности. Для песчаных грунтов рекомендуется комбинирование слоёв – например, TDA поверх GRM или RSM, что позволяет стабилизировать деформации и увеличить поглощение энергии на 10–12 %. Кроме того, важную роль играет глубина заложения демпфирующего слоя:

- при 0,5 м эффект демпфирования — до 50 %,
- при 0,8–1,0 м — до 70 %,
- выше 1,2 м — эффективность почти не растёт.

Таким образом, оптимизация GSI требует учёта свойств грунта, скорости волны Vs30 и пористости для расчёта параметров слоя и прогнозирования поведения системы.

Методологические подходы к оценке эффективности геотехнической сейсмоизоляции. Оценка эффективности систем геотехнической сейсмоизоляции (GSI) является одной из центральных задач при разработке технологий повышения сейсмостойкости зданий. Для того чтобы результаты лабораторных и численных исследований можно было корректно сопоставлять, используются стандартизованные показатели, характеризующие динамическое поведение системы «грунт-фундамент-здание».

Основные критерии оценки. В современной научной практике эффективность GSI определяется через совокупность динамических параметров, отражающих уровень диссипации энергии, смещение частотного спектра и изменение инерционных характеристик. Основные показатели включают:

Коэффициент демпфирования (ξ):

Характеризует долю механической энергии, рассеиваемой системой при каждом цикле колебаний. Для большинства грунтовых систем $\xi \approx 0,03\text{--}0,05$, при применении демпфирующих оснований он возрастает до 0,10–0,15, что соответствует трёхкратному росту энергоёмкости [2–4].

Коэффициент снижения пиковых ускорений (K_a):

$$K_a = \frac{a_{GSI}}{a_{ref}} \quad (1)$$

где, a_{GSI} – ускорение основания с демпфирующим слоем, a_{ref} – без него. В экспериментах [2–5] этот коэффициент изменялся в диапазоне 0,3–0,6, что означает снижение ускорений на 40–70 %.

Изменение периода собственных колебаний (T/T_0): Отношение периода системы с GSI к начальному периоду сооружения. Для зданий средней этажности увеличение T/T_0 на 1,3–1,8 раза указывает на переход из зоны резонанса к более устойчивому частотному диапазону [3,6]. Относительное снижение изгибающих моментов (M_s/M_0) и срезающих усилий (Q_s/Q_0): Эти показатели отражают снижение нагрузок на несущие конструкции и определяются с помощью численных моделей (метод конечных элементов). Средние значения из работ [4–6] составляют $M_s/M_0 = 0,35\text{--}0,45$ и $Q_s/Q_0 = 0,30\text{--}0,40$, что соответствует снижению усилий на 55–70 %.

Индекс энергетического поглощения (E_a): Рассчитывается как отношение энергии, рассеянной в демпфирующем слое, к полной энергии сейсмического воздействия. В экспериментах [2–4,7] значения E_a достигали 0,45–0,60, что подтверждает способность демпфирующих оснований превращать до 60 % энергии вибраций в тепловые потери.

Методы экспериментальной и численной оценки

Оценка эффективности проводится по трём основным направлениям: лабораторные испытания, полевые наблюдения и численные расчёты.

а) Лабораторные исследования.

Используются вибростенды и центрифужные установки, моделирующие воздействие землетрясений различной интенсивности. Примеры: В опытах [2] резинопесчаные смеси (RSM) испытывались при ускорениях до 0,4g; В [3] для GRM использовались синусоидальные воздействия частотой 2–10 Гц; В [5] проведены крупномасштабные испытания TDA-подушек при моделировании землетрясений магнитудой 6–7. Такие эксперименты позволяют определить реальную жёсткость, остаточные деформации и коэффициент внутреннего трения материалов при циклическом нагружении.

б) Полевые наблюдения.

Используются акселерометры и тензодатчики, встраиваемые в фундаментные конструкции. В ходе наблюдений фиксируются параметры вибрации при слабых и умеренных землетрясениях. Результаты [4–6] показали, что реальные значения снижения ускорений соответствуют лабораторным данным с погрешностью не более 10 %, что подтверждает надёжность методики.

в) Численное моделирование.

Наиболее распространён подход конечных элементов (FEM), реализованный в программных пакетах *ABAQUS*, *PLAXIS 3D*, *MIDAS GTS NX*. Эти модели позволяют учитывать нелинейное поведение грунтов, контактные напряжения и многослойные структуры демпфирующих прослоек. Например, расчёты [5,7,9] показали, что введение слоя TDA толщиной 1 м снижает амплитуду спектрального ускорения на 65 %, что согласуется с натурными экспериментами.

Анализ достоверности и сходимости данных. Для сопоставления результатов используется критерий сходимости Δ , определяемый как:

$$\Delta = \frac{|R_{exp} - R_{num}|}{R_{exp}} * 100\% \quad (2)$$

где R_{exp} – экспериментальные данные, R_{num} – результаты численных расчётов. Во всех рассмотренных работах [2-7] значение Δ не превышало $\pm 12\%$, что свидетельствует о высокой точности моделей и надёжности используемых методик.

Дополнительно анализируется форма отклика сооружения, полученная из акселерограмм. При применении GSI характерна амплитудная стабилизация – пик ускорений снижается, а длительность вибраций увеличивается, что указывает на рост энергоёмкости системы. Практические критерии выбора оптимального решения. В инженерной практике эффективность GSI оценивается не только по физическим параметрам, но и по экономическим и эксплуатационным критериям. Согласно обобщению [2-10]:

- RSM и GRM целесообразны для зданий до 10-12 этажей, при умеренных нагрузках (до 300 кПа);
- TDA – для тяжёлых сооружений и объектов транспортной инфраструктуры;
- LBSTRP – при низком бюджете и в районах средней сейсмичности;
- EPS и композиты – для модернизации существующих объектов и локального повышения устойчивости.

Таким образом, оценка эффективности GSI базируется на интеграции трёх уровней анализа – экспериментального, численного и энергетического, что обеспечивает достоверное понимание поведения системы при сейсмических воздействиях. Применение такой многоуровневой методологии позволяет не только классифицировать материалы по эффективности, но и прогнозировать их поведение в реальных инженерных условиях.

Результаты исследований, обсуждение. Сравнение данных из публикаций [2-15] показывает, что эффективность геотехнической сейсмоизоляции зависит от типа применяемого материала, толщины слоя и свойств основания.

Резино-песчаные (RSM) и гравийно-резиновые (GRM) смеси обеспечивают стабильное снижение динамического отклика на 50–65 %. Они универсальны, просты в устройстве и подходят для большинства грунтов. Добавление 20–30 % резины повышает демпфирование до 0,10–0,12 и увеличивает период колебаний зданий примерно в 1,5 раза. Щебень из переработанных шин (TDA) показывает наибольшую энергоёмкость: снижение ускорений достигает 70–75 %, а устойчивость к циклическим нагрузкам делает его эффективным для фундаментов и тоннелей. Оптимальная толщина TDA-слоя – около 1 м, что подтверждено численными моделями [11, 14].

Слоёные прокладки LBSTP выделяются низкой стоимостью и простотой применения, обеспечивая до 60 % снижения ускорений и увеличение периода в 1,3–1,6 раза. Эти решения целесообразны в малоэтажном строительстве. Песчаные подушки и вставки из вспененного полистирола (EPS) эффективны как дополнительные амортизирующие слои. Они уменьшают воздействие на конструкции на 25–50 %, особенно на слабых грунтах.

Композитные технологии – щёлочестойкий стекловолокнистый бетон (AR-GFRC) и полиуретановые инъекции (PU) – позволяют управлять свойствами основания без капитальных работ. Их эффективность составляет 30–60 %, что делает их востребованными при реконструкции и усилении фундаментов [9–10, 15]. Результаты численного моделирования [11–13] подтверждают, что округлая форма частиц и оптимальная плотность укладки повышают энергоёмкость слоя на 10–15 %. Комбинированные системы (например, TDA+PU или GRM+EPS) демонстрируют усреднённое снижение ускорений до 80 %, объединяя преимущества нескольких методов.

Таблица 2 – Сводная таблица эффективности

Метод	Среднее снижение ускорений, %	Увеличение периода, раз	Эффективность демп-Фиорования, %	Преимущества	Ограничения
RSM	40–70	1.3–1.6	60	Простота, экологичность	Осадки при избытке резины
GRM	50–60	1.4–1.7	65	Прочность, стабильность	Требует уплотнения
TDA	60–75	1.5–1.9	80	Устойчивость, долговечность	Стоимость
LBSTP	55–65	1.3–1.6	60	Простота, переработка	Малоэтажность
Marine Sand	25–45	1.2–1.4	40	Доступность	Вымывание
EPS	25–50	1.2–1.5	45	Лёгкость, монтаж	Уязвимость
AR-GFRC / PU	30–60	1.3–1.6	55	Модернизация	Высокая цена
Гибридные системы	65–80	1.5–2.0	85	Адаптивность, энергоёмкость	Сложность реализации

Заключение. Геотехническая сейсмоизоляция является эффективным инструментом управления динамическим откликом зданий при землетрясениях. На основе анализа более десяти экспериментальных и численных исследований установлено, что:

- Введение демпфирующих оснований позволяет снизить пиковые ускорения на 40–75 %, уменьшить срезающие усилия на до 70 %, и увеличить период собственных колебаний в 1,5–2 раза.
- Эффективность зависит от класса грунта: на плотных грунтах (I–II класс) — до 70 %, на слабых (III–IV) — 30–45 %.
- Наиболее энергоёмкие решения — TDA и GRM, обеспечивающие сочетание прочности и демпфирования.

- RSM и LBSTP — оптимальны для малоэтажных зданий и экономичных проектов.
- Композитные материалы (AR-GFRC, PU) — ключ к адаптивной модернизации и реконструкции.

Таким образом, GSI формирует новую концепцию сейсмостойкого строительства, основанную не на повышении жёсткости, а на умном управлении динамическим взаимодействием “грунт–здание”, что открывает перспективы повышения безопасности при оптимальных экономических затратах.

Литература:

[1] GB 50011-2010. Code for Seismic Design of Buildings. China Standard Press, 2010.

[2] **Tsang, H.H.**, Pitilakis K. Full-scale testing of rubber–sand mixtures for seismic isolation of foundations. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2024.

[3] Anastasiadis, A. EuroProteas experimental investigation of GRM seismic isolation pads. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2023.

[4] **Athanopoulos, G.A.** Use of Tire-Derived Aggregates (TDA) in geotechnical seismic isolation. *Engineering Structures*, 2023.

[5] **Ghosh, S.** Seismic isolation of tunnels using TDA cushions. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2024.

[6] **Shrestha, S.** Low-cost seismic isolation using Layered Base Shredded Tire Pads (LBSTP). *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2022.

[7] **Liu, H.** Marine sand cushion for seismic protection of structures. *Ocean Engineering*, 2024.

[8] **Liu ,C.** EPS inserts for seismic response reduction in retaining walls. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2023.

[9] **Zhang, Y.** Seismic response of AR-GFRC tunnel linings under dynamic loading. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2024.

[10] **Chen, J.** Polyurethane injections for seismic retrofitting of foundations. *Construction and Building Materials*, 2024.

[11] **Agarwal, P.**, Singh D. Numerical modelling of energy dissipation in rubber-modified foundation soils. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2023.

[12] **Kim, S.**, Lee C. Dynamic behaviour of rubberized soils under cyclic loading. *Construction and Building Materials*, 2024.

[13] **Abdollahi, H.**, Moradi A. Influence of particle geometry on damping performance of rubber–sand mixtures. *Engineering Structures*, 2023.

[14] **Wu, J.**, Zhao B. 3D finite-element simulation of tire-derived aggregate seismic cushions. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2024.

[15] **Santos, R.**, Almeida J. Field performance of polyurethane composite layers for seismic foundation isolation. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2023.

ФИМАРАТТАР ҮШИН ӘРТҮРЛІ ТЕЖЕУШІ НЕГІЗ ТҮРЛЕРІН ҚОЛДАНА ОТЫРЫП, ГЕОТЕХНИКАЛЫҚ СЕЙСМОИЗОЛЯЦИЯНЫҢ ТИМДІЛІГІН ЗЕРТТЕУ

Абиева Г.С., техникалық ғылымдар кандидаты
Ниетбай С.Е., PhD

Зхруллаев И.С., «7М07321 Құрылым (ғылыми-педагогикалық бағыт)» БББ 1-курс магистранты

Халықаралық білім беру корпорациясы, Алматы қ., Қазақстан

Аннотация. Мақалада ғимараттардың геотехникалық сейсмоқашаулауы (GSI) саласындағы заманауи зерттеулерге кешенді шолу және аналитикалық қорыту ұсынылған. Бұл тәсіл ғимараттардың сейсмотұрақтылығын іргетас негіздерінің динамикалық қасиеттерін өзгертудің есебінен арттыруға бағытталған. 2022–2024 жылдары халықаралық беделді ғылыми журналдарда (*Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, *Engineering Structures*, *Tunnelling and Underground Space Technology* және т.б.) жарияланған он беске жуық тәжірибелік және сандық зерттеулердің нәтижелері

қарастырылған. Құмды – резиналық (RSM), қырышық тасты-резиналық (GRM), қайта өндөлген шиналардан алғынған қырышық тас (TDA), полимерлі қабаттар (EPS) және композиттік материалдар (AR-GFRC, полиуретан) сияқты тежегіш негіздердің тиімділігіне салыстырмалы талдау жүргізілді. Мұндай негіздерді қолдану ғимараттардың қолдану шарықтау үдеулерді 40–75 %-ға дейін төмендетіп, меншікті тербеліс кезеңін 1,5–2 есеге арттыратыны және құрылым элементтеріндегі илу және қылу күштерін 70 %-ға дейін азайтатыны көрсетілді. GSI тиімділігі инженерлік-геологиялық жағдайларға, қабаттың тығыздығы мен қалындығына және толқын таралуының параметрлеріне тәуелді екені анықталды. Ең жогары энергия сініру қасиеттері TDA және GRM жүйелерінде байқалады. Композиттік және гибридтік технологияларды қолдану іргетастарды құрдели құрылышсыз бейімделген түрде жаңғыруға мүмкіндік береді. Зерттеу нәтижелері GSI технологиясының «жасыл» және сейсмотұрақты құрылым саласындағы болашағы зор бағыт екенін дәлелдейді.

Тірек сөздер: ғимараттардың сейсмотұрақтылығы, тежегіш негіздер, ғимарат-топырақ өзара әрекеттесуі.

INVESTIGATION OF THE EFFECTIVENESS OF GEOTECHNICAL SEISMIC ISOLATION OF BUILDINGS USING VARIOUS TYPES OF DAMPING FOUNDATIONS

Zkhrullaev I.S., «7M07321 Construction (scientific and pedagogical direction)»

Niyetbay S.E., PhD

Abieva G.S., Candidate of Technical Sciences

International Educational Corporation, Almaty, Kazakhstan

Annotation. The article presents a comprehensive review and analytical synthesis of modern research in the field of geotechnical seismic isolation (GSI) of buildings, aimed at improving structural seismic resistance by modifying the dynamic properties of foundations. The study summarizes more than fifteen experimental and numerical investigations published during 2022–2024 in leading international journals such as *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, *Engineering Structures*, and *Tunnelling and Underground Space Technology*. A comparative analysis of the efficiency of various types of damping foundations is provided, including sand–rubber (RSM), gravel–rubber (GRM), tire-derived aggregate (TDA), polymer layers (EPS), and composite materials (AR-GFRC, polyurethane). The results demonstrate that such damping foundations can reduce peak accelerations by 40–75%, increase the natural vibration period of buildings by 1.5–2 times, and decrease bending and shear forces in structural elements by up to 70%. The efficiency of GSI is found to depend on geotechnical conditions, density and thickness of the damping layer, and wave propagation characteristics in the soil. The most energy-efficient systems are TDA and GRM, providing an optimal balance between strength and damping capacity. The use of composite and hybrid technologies opens new opportunities for adaptive retrofitting of foundations without major reconstruction. The findings confirm that GSI represents a promising direction for “green” and earthquake-resistant construction, enhancing the safety, durability, and sustainability of buildings with reasonable economic costs.

Keywords: seismic resistance of buildings, damping foundations, soil–structure interaction.