DOI: 10.15593/24111678/2018.02.03

УДК 624.138.1

**М.Ю. Карнаухова¹, В.А. Кашеварова¹, Ю.А. Кузнецова^{1, 2}, К.С. Лезина^{1, 2},
О.А. Маковецкий^{1, 2}, И.И. Хусаинов^{1, 2}**

¹ Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

² ОАО «Нью Граунд», Пермь, Россия

ОЦЕНКА СЕЙСМИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ И КОНСТРУКТИВНЫЕ МЕТОДЫ ЗАЩИТЫ ЗДАНИЙ

Рассматриваются подходы к оценке сейсмического воздействия на подземные части зданий и сооружений и анализируются возможные мероприятия по их минимизации. Разработка перспективных методов конструктивной сейсмозащиты диктуется настоятельной необходимостью и требованиями повышения безопасности зданий и сооружений повышенной защищенности. Без знания реальных геодинамических рисков (воздействие землетрясений, колебания уровня подземных вод) вложение финансовых средств в сейсмобезопасность будет неэффективным. Основной задачей исследований является разработка комплекса мероприятий по оценке сейсмогеотехнической ситуации площадки строительства в связи с тем, что в настоящее время: учет сложных грунтовых условий оценивается весьма грубо, сейсмичность территории определяется по усредненным показателям; геодинамические данные (балльность) недостаточны для моделирования и расчета подземной части здания; отсутствует практика комплексного исследования системы (грунтовое основание — подземная часть — верхнее строение) до и после строительства.

На основе подробных исходных данных сейсмического микрорайонирования можно выполнить уточнение сейсмической опасности и обеспечить эффективные меры сейсмозащиты высотных зданий. Приводится анализ современных методов конструктивной защиты зданий в сейсмоопасных районах. Представлена классификация существующих систем классической сейсмозащиты по принципу их работы. Проанализированы основные методы и сформулированы общие выводы и принципы сейсмозащиты отдельных конструкций и зданий в целом. Рассмотрены варианты конструктивных решений по устройству фундаментов с разделительным слоем, конструкция и методы возведения вертикальных и горизонтальных геотехнических барьеров. Приведены основные достоинства и недостатки описанных методов. Определена основная тенденция развития сейсмозащиты зданий и выбрано направление дальнейших исследований: сбор и анализ экспериментального материала по изменению сейсмической жесткости грунтовых оснований, модифицированных армированием жесткими вертикальными грунтобетонными элементами с устройством по ним распределительного слоя.

Ключевые слова: строительство в сейсмических районах, сейсмозащита зданий, методы сейсмоизоляции, сейсмостойкий фундамент, геотехнические барьеры (экраны).

**M.Yu. Karnaukhova¹, V.A. Kashevarova¹, Iu.A. Kuznetsova^{1, 2}, K.S. Lesina^{1, 2},
O.A. Makovetskiy^{1, 2}, I.I. Husainov^{1, 2}**

¹ Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

² Company "New Ground", Perm, Russian Federation

EVALUATION OF SEISMIC LOAD AND CONSTRUCTIVE METHODS FOR BUILDINGS PROTECTION

In the article approaches to assessing the seismic load on the underground parts of buildings and structures are discussed and possible measures to minimize them are analyzed. The development of promising methods for structural seismic protection is dictated by the urgent need and requirements to improve the safety of buildings and structures of increased security. Without knowing real geodynamic risks (impact of earthquakes, fluctuations in groundwater levels) investment of funds in seismic safety will be ineffective. On the basis of detailed initial data of seismic micro zoning it is possible to perform specification of seismic danger and ensure effective measures of seismic protection of high-rise buildings. The analysis of modern methods of constructive protection of buildings in seismic areas is given. The classification of existing systems of classical seismic protection on the principle of their work is presented. The basic methods are analyzed and general conclusions and principles of seismic protection of separate structures and buildings as a whole are formulated. The variants of design solutions for the foundations with a separation layer, as well as the construction and methods of erection of vertical and horizontal geotechnical barriers are considered. The main advantages and disadvantages of the described methods are given. The main trend in the development of seismic protection of buildings is defined and the area for further research is selected,

which is the collection and analysis of experimental material on the change in seismic stiffness of soil bases modified by reinforcement with rigid vertical soli-concrete elements with a distribution layer upon them.

Keywords: construction in seismic areas, seismic protection of buildings, methods of seismic isolation, earthquake-resistant foundation, geotechnical barriers (screens).

Сегодня все большее значение при проектировании зданий и сооружений, при реконструкции существующих объектов приобретают проблемы, связанные с динамическими воздействиями на массивы грунта. Одной из главных динамических нагрузок является нагрузка от колебаний земной коры – сейсмические воздействия.

Федеральный закон 384-ФЗ «Технический регламент безопасности зданий и сооружений» требует от всех участников процесса строительства выполнения комплекса геолого-геофизических исследований, гарантирующего безопасности объекта на всех этапах его жизненного цикла. Без знания реальных геодинамических рисков (воздействие землетрясений, колебания уровня подземных вод) вложение финансовых средств в сейсмобезопасность будет неэффективным. На основе подробных исходных данных сейсмического микрорайонирования можно выполнить уточнение сейсмической опасности и обеспечить эффективные меры сейсмозащиты высотных зданий.

Разработка перспективных методов конструктивной сейсмозащиты диктуется настоятельной необходимостью и требованиями повышения безопасности зданий и сооружений повышенной защищенности [1, 2].

1. Оценка сейсмического воздействия на подземную часть

Основной задачей дальнейших исследований является разработка комплекса мероприятий по оценке сейсмогеотехнической ситуации площадки строительства в связи с тем, что в настоящее время: учет сложных грунтовых условий оценивается весьма грубо, сейсмичность территории определяется по усредненным показателям; геодинамические данные (балльность) недостаточны для моделирования и расчета подземной части здания; отсутствует практика комплексного исследования системы (грунтовое основание – подземная часть – верхнее строение) до и после строительства. Решение этой задачи требует рассмотрения возможностей микросейсморайонирования.

Принципы оценки сейсмичности площадки строительства с учетом инженерно-геологических условий и характера ее нагружения изложены в работах А.С. Алешина [3–5], Н.П. Абовского [6].

После проведения сейсмического микрорайонирования района строительства фоновая сейсмичность для проектирования строительных объектов может быть изменена на единицы баллов, в зависимости от местных грунтовых и гидрогеологических условий.

Так, если сейсмичность района составляет 7, 8, 9 баллов, то для скальных грунтов всех видов (I категории грунтов) сейсмичность площадки уменьшается и составляет соответственно 6, 7, 8 баллов; для крупнообломочных грунтов (II категории) сейсмичность площадки строительства не изменяется и имеет те же значения – 7, 8, 9 баллов; для рыхлых гравелистых песков, влажных и водонасыщенных расчетная сейсмичность площадки строительства повышается и составляет уже 8, 9 и более баллов (рис. 1).

Таким образом, как следует из этих данных, жесткое скальное основание уменьшает опасность сейсмических воздействий, а слабые водонасыщенные грунты ее повышают. Наибольшее влияние на уточнение фоновой сейсмичности площадки строительства оказывают обводненность подстилающих пород (уровень подземных вод), согласованность залегания грунтовых слоев, изменчивость рельефа площадки.

При сейсмическом микрорайонировании площадки строительства нормальные амплитудные характеристики колебаний грунта дополнительно корректируются с учетом местных инженерно-геологических условий. Вводится поправочный коэффициент, модифицирующий

расчетные значения амплитуд перемещения, скоростей и ускорения грунтовой толщи, определяющих сейсмическое воздействие на сооружение.

Рис. 1. Схема поперечного разреза территории с сейсмичностью 8 баллов с выделением отдельных зон (микросейсмизация): 1 – район расположения скальных пород, сейсмичность уменьшается на 1 балл; 2 – на склонах возможны оползни, сейсмичность увеличивается на 1 балл; 3 – при высоком положении уровня грунтовых вод (УГВ) сейсмичность увеличивается на 1 балл

Микросейсмрайонирование площадки строительства позволяет:

- отметить особую роль скоростей поперечных волн и сейсмической жесткости как наиболее информативных характеристик сейсмических свойств грунтов;
- отказаться от обязательного использования поправки на уровень грунтовых вод с помощью сейсморазведки на поперечных волнах;
- использовать расчетные модели грунта, учитывающие как упругие, так и упругопластические свойства грунта при значительных динамических воздействиях.

2. Конструктивные методы сейсмозащиты

Большой вклад в развитие теории сейсмостойкости внесли: Я.М. Айзенберг, А.М. Белостоцкий, К.С. Завриев, Г.Н. Карцивадзе, И.Л. Корчинский, В.Л. Мондрус, А.Г. Назаров, Н.А. Николаенко, А.Е. Саргсян, Э.И. Хачиян, Г.Э. Шаблинский и др. [7, 8].

Решить задачу обеспечения целостности конструкций или минимизации повреждений от сейсмической нагрузки с помощью увеличения сечений конструктивных элементов зданий полностью невозможно. Конструкция станет более прочной, но не обязательно экономически эффективной, ввиду того что вес и инерционная сейсмическая нагрузка могут возрасти еще больше. Поэтому появляется необходимость в разработке новых эффективных конструкций и методов сейсмозащиты.

При строительстве в сложных грунтовых условиях с учетом повышенной сейсмичности рационально вместо адаптации традиционных конструкций использовать другие конструктивные решения: рациональное пространственное формообразование единой системы «фундамент – здание»; разработку конструкций, малочувствительных к негативным сейсмическим воздействиям; использование геотехнических барьеров, которые минимизируют передачу энергии сейсмических колебаний на подземную часть здания.

В.А. Ильичевым [9–11] исследовались вопросы теории колебаний и распространения волн в грунте, разработаны первые нормативные документы, регламентирующие проектирование и возведение сооружений, подвергающихся динамическим (сейсмическим) воздействиям.

А.М. Уздиным [12] предложена общая классификация существующих систем сейсмозащиты, которую можно представить в виде модифицированной схемы (рис. 2).

Согласно этой классификации сейсмозащиту зданий и сооружений можно разделить на две группы: *традиционная* – повышение прочности и жесткости сечений конструктивных элементов, и *специальная*, которая позволяет снижать сейсмическую нагрузку за счет целенаправленного изменения динамической схемы работы сооружения.

Рис. 2. Классификация систем сейсмозащиты по принципу их работы

Специальная сейсмозащита подразделяется на *активную*, предполагающую использование дополнительного источника энергии и требующую значительных затрат на ее устройство и эксплуатацию, и *пассивную*, включающую в себя две системы: сейсмогашение и сейсмоизоляцию.

Система сейсмогашения предполагает использование демпферов и динамических гасителей, благодаря которым механическая энергия, возникающая при колебании конструкции, переходит в другие виды энергии и приводит к демпфированию колебаний или происходит перераспределение энергии от защищаемой конструкции к гасителю.

При сейсмоизоляции возможно снижение механической энергии, распространяющейся от основания на конструкцию, путем отстройки частот колебаний сооружения от преобладающих частот воздействия. Принято различать стационарные и адаптивные системы сейсмоизоляции. В первом случае динамические характеристики постоянны в процессе землетрясения. Во втором случае динамические характеристики сооружения не постоянны и значительно изменяются в процессе землетрясения.

Среди систем стационарной сейсмоизоляции наибольшее распространение получили сейсмоизолирующие фундаменты, которые, в свою очередь, делят на две группы в зависимости от проявления или отсутствия возвращающей силы при взаимном смещении сейсмоизолированных частей сооружения: упругие и кинематические опоры гравитационного типа – конструкции с возникающей возвращающей силой между сейсмоизолированными частями сооружения; скользящий пояс – пример использования сейсмоизоляции, которая не обеспечивает возвращающей силы.

2.1. Фундаменты с разделительным слоем

Рассмотрим наиболее интересные конструктивные решения фундаментов с применением стационарной сейсмоизоляции, приведенные в следующих патентных материалах:

1. Авторское свидетельство SU № 600252 Фундамент сейсмостойкого здания (Кранцфельд Я.Л. и др., 1978). Увеличение податливости упругого слоя без изменения габаритов фундамента.

2. Авторское свидетельство SU №1763580 А1. Фундамент сейсмостойкого здания, сооружения (Кранцфельд Я.Л. и др., 1990). Ростверк выполнен из нескольких частей (центральной и периферийной), зазор между ними заполнен упругим материалом.

3. Патент RU 2 119 012. Фундамент для сейсмостойкого здания (Безруков Ю.И., Безруков О.Ю., 1994). Фундамент состоит из верхнего и нижнего элемента, между которыми расположен промежуточный слой из сыпучего материала.

4. Патент RU 2 209 883. Фундамент резервуара (Шадунц К.Ш., 2001). Опорная плита устанавливается на грунтовую подушку. Опорные тяжи проходят сквозь грунтовую подушку.

5. Патент RU 2 334 843. Сейсмостойкий свайный фундамент (Столяров В.Г., 2005). Между подошвой ростверка и промежуточной подушкой из гранулированных материалов проложен скользящий слой.

6. Патент RU 55388. Пространственная железобетонная фундаментная платформа для малоэтажных зданий для строительства в особых грунтовых условиях и сейсмичности в сборном и монолитном вариантах (Абовский Н.П. и др., 2006). Платформа состоит из верхней и нижней плиты, установленной на поверхности грунта со скользящим слоем, соединенных между собой балками.

7. Патент RU 2 406 803. Способ сейсмоизоляции фундаментов сооружений (Пышкин Б.А., Пышкин А.Б., Пышкин С.Б., 2009). Формирование распределительного слоя, отсыпка подушки на часть глубины котлована, размещение на подушке фундаментных блоков и засыпка пазух котлована,

8. Патент RU 136667. Сейсмостойкий свайный фундамент (Шулятьев О.А., Боков И.А., 2013). Между сваями, имеющими уширенный оголовок и железобетонный ростверк, расположена песчаная подушка, армированная двумя слоями геосинтетической сетки. В поверхность грунта втрамбован слой щебня толщиной более четверти расстояния между осями свай.

9. Патент RU 2 634 139. Каркасная универсальная полносборная архитектурно-строительная система (Шпелер А.К., Семенюк П.Н., Овсянников С.Н., 2016). Монолитный железобетонный ростверк устанавливается на промежуточную подушку из щебня с бетонной подготовкой, расположенной поверх свайного основания.

10. Патент на изобретение RU 2 512 054 С1. Комплексная система сейсмозащиты здания или сооружения (Абовский Н.П. и др., 2012). Комплексная система сейсмозащиты здания или сооружения, включающая сейсмостойкое здание замкнутого типа на пространственной фундаментной платформе со скользящим слоем в основании, имеющем верхнюю и нижнюю плиты.

В большей части патентов авторами предложены конструкции устройства фундаментов, в состав которых входит разделительный слой, чаще всего упругий. В качестве такого слоя применяется: влагостойкий материал; гранулированный материал; песчаная подушка, армированная двумя слоями геосинтетической сетки; сыпучий материал; щебень с бетонной подготовкой.

Сыпучий слой является демпфером, в котором рассеивается часть сейсмической энергии (явление диссипации). В демпфере, за счет развития сухого и вязкого трения, происходит затухание амплитуды колебаний, что приводит к снижению силы колебаний на величину от 0,5 до 2,5 балла.

Эффект от применения промежуточной подушки определяется ее конструктивными параметрами (толщиной подушки и крупностью используемого материала) и выражается в оптимизации рабочего диапазона «гашения сейсмических колебаний». Верхний уровень свойств гашения колебаний рассеивающего слоя устанавливается не ниже верхнего уровня колебаний прогнозируемой сейсмоопасности. Соответствие ему определяют на основе сейсмограмм, по разнице значений верхнего и нижнего уровня колебаний в системе «основание – подушка – фундамент» при прохождении сейсмической волны через подушку из сыпучего материала. Это позволяет максимально ограничить сейсмическое воздействие на сооружение, удерживая его на требуемом уровне, для конкретного типа сейсмогасящей подушки [13].

Оптимальный конструктивный вариант фундамента с рассеивающим слоем для соответствующей сейсмоопасности в районе возведения фундамента требует подбора рабочего диапазона «гашения сейсмических колебаний» в соответствии с их конструктивными параметрами подушки (ее мощностью, крупностью обломочного материала). Математическое моделирование системы «основание – сейсмоизоляция – фундамент», включая неоднородность грунтового основания и промежуточной подушки, разнообразие типов фундаментов, их инерционные и динамические свойства, представляется весьма сложной задачей [14].

2.2. Вертикальные геотехнические барьеры (экраны)

Защита здания от землетрясения может реализовываться без конструктивного вмешательства в его несущий остов путем устройства вертикального защитного геотехнического барьера (экрана) [15, 16].

Конструктивные решения по устройству вертикальных поглощающих экранов были отражены в следующих патентных разработках:

1. Авторское свидетельство СССР SU № 343000. Устройство для гашения сейсмических волн (Вовк А.А., Черный Г.И., 1972) представляет собой цепь скважин, заполненных пористым материалом и предназначенных для защиты от объемных и поверхностных волн. Скважины располагаются в два ряда в шахматном порядке.

2. Авторское свидетельство СССР SU № 817150. Экран для защиты фундаментов зданий, сооружений от воздействия колебаний (Лаптева Н.Н., Чернышев Ю.Г., 1979). Экран представляет собой траншею, выполненную вокруг контура фундамента, заполненную материалом, поглощающим колебания. Недостатком этого экрана является низкая эффективность защиты за счет нарушения целостности системы грунт – фундамент при исчерпании демпфирующих свойств засыпки траншеи.

3. Авторское свидетельство SU № 1744203 A1. Устройство для защиты объекта от сейсмического воздействия (Балбачан И.П., 1989). Экран размещен в грунте вокруг защищаемого объекта. Акустическая жесткость экрана меньше, чем жесткость грунта. Образующие экрана создают в вертикальной плоскости треугольный контур.

4. Авторское свидетельство SU № 1612060. Устройство для защиты объекта от сейсмического воздействия (Л.К. Малышев, Я.И. Натариус, 1990). Представляет собой кольцевую в плане сплошную или прерывистую щель из скважин, заполненную акустически более жестким материалом (бетоном), чем грунт.

5. Авторское свидетельство SU № 1629416. Экран для защиты зданий и сооружений от сейсмических воздействий (Шишков Ю.А. и др., 1991). Экран, включающий размещенные вокруг здания, сооружения внутренний и внешний ряды скважин, заполненных поглощающим колебания материалом и расположенных в рядах в шахматном порядке.

6. Авторское свидетельство SU № 1776720 A2. Устройство для защиты объекта от сейсмического воздействия (Беродзе З.И. и др., 1992). Конструкция включает дополнительный экран, полностью прилегающий к внутренней поверхности основного экрана. Дополнительный экран выполнен из упругопластичного материала, плотность и модуль деформации которого меньше плотности и модуля деформации грунта.

7. Авторское свидетельство SU 1448090 A1. Экран для защиты сооружений от воздействия колебаний грунта (Ильичев В.А. и др., 1992). Экран включает размещенную в траншее между источником колебаний и защищаемым объектом жесткую стенку из монолитного железобетона, имеющую выступы. Высота выступов равна полудлине волны, а их периодичность не превышает длину волны колебаний, воздействующих на экран.

8. Патент РФ 2006553. Экран для защиты зданий от сейсмических воздействий (Пронин Е.С., Русинов А.В., 1994). Экран располагается вокруг сооружения, в виде погруженной в грунт оболочки, выполненной из соединенных железобетонных секций. Масса грунта, заключенная внутри оболочки, соответствует массе сооружения, а оболочка по форме в плане представляет собой звезду. Недостатком такого экрана является разрушение структуры грунта, прилегающего с внутренней стороны звезды, что снижает эффективность работы, а также расслоение грунтового массива.

9. Патент на изобретение RU 2 298 614 C1. Способ защиты зданий и сооружений от вибрации (Алешин А.С. и др., 2006). Выполнение основного вертикального экрана между активной зоной вибрации и зданием или сооружением производится бурением одного или нескольких рядов скважин, на глубину не менее половины длины поверхностной волны. Устройство до-

полнительного экрана под основанием здания или сооружения в виде скважин, пробуренных по равномерной сетке на глубину, не превышающую глубину вертикального экрана. Скважины вертикального и дополнительного экранов опресовываются уплотняющим раствором.

Общим во всех конструктивных решениях является устройство в грунтах сплошных или прерывистых рядов скважин по периметру объекта, заполненных пористой или сплошной структурой, поглощающей колебания.

Недостатком вертикального экрана является то, что защитный контур размещен вокруг здания, сооружения. Гашения воздействия сейсмических волн на грунтовое основание, расположенное непосредственно под самим зданием, минимально.

Общими недостатками предложенных систем являются: большая материалоемкость, сложность изготовления и, как следствие, высокая стоимость сейсмоизолирующих экранов в виде волновых завес; отсутствие теории расчета, которая позволяла бы удовлетворительно определять состав и параметры волновой завесы и оказываемое ею влияние на характер силового воздействия.

2.3. Горизонтальные геотехнические барьеры (волновые экраны)

Волновые барьеры можно устанавливать не только вертикально, но и горизонтально. Изменение ориентации установки завес никак не скажется на способности завесы отражать и преломлять сейсмические волны. Однако при этом горизонтальное изготовление завес намного проще и дешевле.

Горизонтальный барьер – это поверхностный слой с модифицированными свойствами. Модификация свойств может достигаться различными методами. Наиболее эффективный метод – создание слоя с заданными свойствами [17, 18].

Конструктивные и технологические приемы устройства таких оснований приводятся в следующих патентных материалах:

1. Авторское свидетельство SU 1506028 A1. Способ возведения основания в сейсмических районах (Ильичев В.А. и др., 1989). В основании, представляющем собой слой грунта и подстилающий его слой просадочного грунта, выполняются вертикальные элементы путем разработки скважин и заполнения их с трамбованием гравийно-галечниковой смесью. Высота основания равна 1/4 длины распространяющейся в грунте естественного сложения поперечной сейсмической волны, а общая площадь поперечного сечения свай составляет 8 % и более от общей площади основания.

2. Авторское свидетельство SU 1761876 A1. Сейсмостойкое основание здания, сооружения (Ильичев В.А. и др., 1992). Сейсмостойкое основание состоит из основного несущего слоя и промежуточной гравийно-галечниковой подушки. Несущий слой выполнен из забивных свай. Размеры основания в плане соотносятся с длиной поперечной сейсмической волны, а общая площадь поперечного сечения свай составляет 5–7 % от общей площади основания.

3. Патент на изобретение RU 248776 C1. Способ укрепления основания фундаментов в сейсмически опасных зонах (Лубягин А.В., 2011). Этот способ предусматривает вдавливание в грунт инъекторов и подачу через них твердеющего раствора под давлением сначала по контуру укрепляемого участка, а после отвердевания раствора – внутри полученного контура.

4. Патент на изобретение RU 2 475 595. Барьер для защиты застроенных территорий от поверхностных сейсмических волн (Кузнецов С.В., Мкртычев О.В., Нафасов А.Э.). Барьер для защиты застроенных территорий от поверхностных сейсмических волн окружает защищаемую территорию, верхняя грань барьера находится на поверхности грунта. Форма барьера выпуклая, ширина барьера – не меньше одной длины поверхностной волны, глубина барьера должна быть не меньше 1/5 длины поверхностной волны.

В результате представленного сопоставительного анализа конструктивных возможностей волновых завес следует, что практический интерес представляют лишь горизонтальные барье-

ры – искусственные основания. Наиболее рациональный способ устройства такого рода оснований – «структурный геомассив», выполняемый с использованием технологии струйной цементации грунта.

Это предположение было проверено авторами в геологических условиях Краснодарского края. При строительстве комплекса высотных зданий «Парусная регата» был выполнен горизонтальный геотехнический барьер с использованием жестких грунтобетонных армирующих элементов. Проведение микросейсморайонирования до и после устройства геотехнического барьера показало, что устройство горизонтального геотехнического барьера в виде «структурного геомассива» приводит к повышению сейсмической жесткости площадки строительства, что позволяет снизить ее категоричность по условиям сейсмичности [19].

Проанализировав представленные материалы, можно сделать вывод, что сейсмические барьеры обладают преимуществами перед более традиционными системами сейсмической защиты, в частности:

1. Геотехнические барьеры располагаются за пределами защищаемых зданий и сооружений, повреждение барьера или его части не повлечет за собой повреждение защищаемого объекта.

2. Сейсмоизолирующие устройства эффективны в определенном диапазоне частот, геотехнические барьеры инвариантны по отношению к частотному спектру землетрясения.

3. Барьеры могут использоваться для защиты зданий и сооружений, построенных на основаниях, сложенных слабыми водонасыщенными грунтами, подверженными виброразжижению и виброползучести.

4. Моделирование сейсмического воздействия на подземные части зданий при применении грунтобетонных геотехнических барьеров выполняется статическим методом конечных элементов, основанным на теории метода подконструкций [20].

Но для практического применения геотехнических барьеров в виде волновых завес требуется накопление экспериментальных данных и разработка комплексной теории расчета, посредством которой можно было бы рассчитывать и подбирать элементы волновой системы (структуру и геометрию основания, конструкцию фундамента и самого строительного объекта) и определять влияние, которое они оказывают на несущие свойства строительной системы [21].

Перспективным направлением исследования, по нашему мнению, является сбор и анализ экспериментального материала по изменению сейсмической жесткости грунтовых оснований, модифицированных армированием жесткими вертикальными грунтобетонными элементами с устройством по ним гибкого распределительного слоя.

Список литературы

1. Мкртычев О.В., Джинчелашвили Г.А., Держинский Р.И. Философия многоуровневого проектирования в свете обеспечения сейсмостойкости сооружений // Геология и геофизика Юга России. – 2016. – № 1. – С. 71–81.
2. ASCE-4-16 Seismic analysis of safety-related nuclear structures and commentary. – USA, 2017. – 304 p.
3. Алешин А.С. Сейсмическое микрораионирование особо ответственных объектов. – М.: Светоч плюс, 2010. – 304 с.
4. Алешин А.С. Континуальная теория сейсмического микрораионирования // Инженерные изыскания. – 2015. – № 9. – С. 10–18.
5. Алешин А.С., Пиоро Е.О. О влиянии обводненности грунтов на результаты сейсмического микрораионирования // Инженерные изыскания. – 2015. – № 9. – С. 34–40.
6. Некоторые проблемные вопросы нормирования и научного обеспечения сейсмобезопасности в Красноярском крае / Н.П. Абовский, В.Г. Сибгатулин, В.И. Палагушкин, И.С. Ин-

жутов, И.Р. Худобердин // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. – 2010. – № 4. – С. 31–34.

7. Казина Г.А., Килимник Л.Ш. Современные методы сейсмозащиты зданий и сооружений. – М.: ВНИИИС, 1987. – 65 с.

8. Поляков В.С., Килимник, Л.Ш., Черкашин А.В. Современные методы сейсмозащиты зданий. – М.: Стройиздат, 1989. – 320 с.

9. Ильичев В.А. Особенности взаимодействия с грунтом большеразмерных фундаментов при сейсмических воздействиях // Сейсмостойкое строительство. – М.: ЦНИИС, 1975. – С. 89–102.

10. Ильичев В.А., Аникьев А.В. Нестационарные горизонтальные колебания фундамента с учетом волнового взаимодействия с грунтовым основанием // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 1980. – № 4. – С. 20–24.

11. Ильичев В.А. К оценке коэффициента демпфирования основания фундаментов, совершающих вертикальные колебания // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 1981. – № 4. – С. 22–26.

12. Уздин А.М., Сандович Т.А., Аль-Насер-Мохомад Самих Амин Основы теории сейсмостойкости и сейсмостойкого строительства зданий и сооружений. – СПб.: ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева, 1993. – 176 с.

13. Абовский Н.П., Палагушкин В.И., Лапеев М.В. Системный подход к сейсмоизоляции зданий при сложных грунтовых условиях // Жилищное строительство. – 2010. – № 3. – С. 7–10.

14. Айзенберг Я.М. Сейсмоизоляция высоких зданий // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. – 2007. – № 4. – С. 41–43.

15. Кранцфельд Я.Л. О конструктивных решениях экранов для инженерной сейсмозащиты территории объектов строительства // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 2011. – № 3. – С. 13–16.

16. Уздин А.М., Фреze М.В. Об эффективности применения экранов в грунте для сейсмозащиты зданий и сооружений // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 2011. – № 3. – С. 17–19.

17. Кузнецов С.В., Нафасов А.Э. Горизонтальные сейсмические барьеры для защиты от сейсмических волн // Вестник МГСУ. – 2010. – Вып. 4. – С. 131–134.

18. Кузнецов С.В. Сейсмические волны и сейсмические барьеры // Акустическая физика. – 2011. – Вып. 57. – С. 420–426.

19. Маковецкий О.А. Анализ изменения сейсмической жесткости основания в системе грунтобетонных геотехнических барьеров // Транспорт. Транспортные сооружения. Экология. – 2017. – № 3. – С. 121–139.

20. Jia B., Li-ping J., Yong-qiang L. Seismic analysis of underground structures based on the static finite element method // The Electronic Journal of Geotechnical Engineering. – 2016. – Vol. 21, bund. 06. – P. 2307–2315.

21. Taucer F., Apostolska R. Experimental Research in Earthquake Engineering. Springer. – New York, 2015. – 624 p.

References

1. Mkrtychev O.V., Dzhinchvelashvili G.A., Dzerzhinskii R.I. Filosofiia mnogourovnevnogo proektirovaniia v svete obespecheniia seismostoikosti sooruzhenii [The philosophy of multilevel design in the light of seismic resistance of buildings]. *Geologiya i geofizika Iuga Rossii*, 2016, no. 4, pp. 71–81.

2. ASCE-4-16 Seismic analysis of safety-related nuclear structures and commentary, USA, 2017, 304 p.

3. Aleshin A.S. Seismicheskoe mikroraionirovanie osobo otvetstvennykh obiektov [Seismic microzoning mission-critical facilities]. Moscow, Svetoch plus, 2010, 304 p.

4. Aleshin A.S. Kontinualnaia teoriia seismicheskogo mikroraionirovaniia [Continuum theory of seismic micro zoning]. *Inzhenernye izyskaniia*, 2015, no. 9, pp. 10–18.

5. Aleshin A.S., Pioro E.O. O vliianii obvodnennosti gruntov na rezultaty seismicheskogo mikroraionirovaniia [About influence of water content of soils on results of seismic zoning]. *Inzhenernye izyskaniia*, 2015, no. 9, p. 34–40.

6. Abovskii N.P., Sibgatulin V.G., Palagushkin V.I., Inzhutov I.S., KHudoberdin I.R. Nekotorye problemnye voprosy normirovaniia i nauchnogo obespecheniia seismobezopasnosti v Krasnoarskom krae [Some problematic issues of regulation and scientific support of seismic safety in the Krasnoyarsk territory]. *Seismostoikey stroitelstvo. Bezopasnost sooruzhenii*, 2010, no. 4, p. 31-34.
7. Kazina G.A., Kilimnik L.SH. Sovremennye metody seismozashchity zdaniy i sooruzhenii [Modern methods of seismic protection of buildings and structures. Review]. Moscow, VNIIS, 1987, 65 p.
8. Poliakov V.S., Kilimnik L.Sh., Cherkashin A.V. Sovremennye metody seismozashchity zdaniy [Modern methods of seismic protection of buildings]. Moscow, Stroiizdat, 1989, 320 p.
9. Ilichev V.A. Osobennosti vzaimodeistviia s gruntom bolsherazmernykh fundamentov pri seismicheskikh vozdeistviiaxh [Peculiarities of interaction with the soil of large-dimensional foundations under seismic effects]. *Seismostoikey stroitelstvo*. Moscow, TSNIIS, 1975, pp. 89-102.
10. Ilichev V.A., Anikev A.V. Nestatsionarnye gorizontálne kolebaniia fundamenta s uchetoм volnovogo vzaimodeistviia s gruntovym osnovaniem [Nonstationary horizontal oscillations of the foundation taking into account the wave interaction with the ground base]. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 1980, no. 4, pp. 20-24.
11. Ilichev V.A. K otsenke koeffitsienta dempfirovaniia osnovaniia fundamentov sovershaiushchikh vertikalnye kolebaniia [To estimate the damping ratio of the Foundation base, making vertical vibrations]. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 1981, no. 4, pp. 22-26.
12. Uzdin A.M., Sandovich T.A., Al-Naser-Mokhomad Samikh Amin. Osnovy teorii seismostoikey i seismostoikey stroitelstva zdaniy i sooruzhenii [Fundamentals of the theory of seismic resistance and earthquake-resistant construction of buildings and structures]. Saint Petersburg, VNIIG im. B.E. Vedeneeva, 1993, 176 p.
13. Abovskii N.P., Palagushkin V.I., Lapeev M.V. Sistemnyi podkhod k seismoizolatsii zdaniy pri slozhnykh gruntovykh usloviiaxh [Systematic approach to seismic isolation of buildings under difficult ground conditions]. *Zhishishchnoe stroitelstvo*, 2010, no. 3, pp. 7-10.
14. Aizenberg Ia.M. Seismoizolatsiia vysokikh zdaniy [The seismic isolation of tall buildings]. *Seismostoikey stroitelstvo. Bezopasnost sooruzhenii*, 2007, no. 4, pp. 41-43.
15. Krantsfeld Ia.L. O konstruktivnykh resheniiakh ekranov dlia inzhenernoi seismozashchity territorii obiektov stroitelstva [About constructive solutions of screens for engineering seismic protection of the territory of construction projects]. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 2011, no. 3, pp. 13-16.
16. Uzdin A.M., Freze M.V. Ob effektivnosti primeneniia ekranov v grunte dlia seismozashchity zdaniy i sooruzhenii [About efficiency of application of screens in the ground for seismic protection of buildings and constructions]. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 2011, no. 3, pp. 17-19.
17. Kuznetsov S.V., Nafasov A.E. Gorizontálne seismicheskie barery dlia zashchity ot seismicheskikh voln [Horizontal seismic barriers for protection against seismic waves]. *Vestnik MGSU*, 2010, iss. 4, pp. 131-134.
18. Kuznetsov S.V. Seismicheskie volny i seismicheskie barery [Seismic waves and seismic barriers]. *Akusticheskaiia fizika*, 2011, iss. 57, pp. 420-426.
19. Makovetskii O.A. Analiz izmeneniia seismicheskoi zhestkosti osnovaniia v sisteme gruntobetonnykh geotekhnicheskikh barerov [Analysis of changes in seismic rigidity of the base in the system of jet-groting geotechnical barriers]. *Transport. Transportnye sooruzheniia. Ekologiya*, 2017, no. 3, pp. 121-139, DOI: 10.15593/24111678/2017.03.08.
20. Jia B., Li-ping J., Yong-qiang L. Seismic analysis of underground structures based on the static finite element method. *The Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 2016, vol. 21, bund. 06, p. 2307-2315.
21. Taucer F., Apostolska R. Experimental research in earthquake engineering. Springer, 2015, 624 p.

Получено 02.05.2018

Об авторах

Карнаухова Мария Михайловна (Пермь, Россия) – магистрант кафедры «Строительное производство и геотехника» Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: mariakarnaukhova3443@gmail.com).

Кашеварова Валерия Александровна (Пермь, Россия) – магистрант кафедры «Строительное производство и геотехника» Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: kashavarovava@gmail.com).

Кузнецова Юлия Андреевна (Пермь, Россия) – магистрант кафедры «Строительное производство и геотехника» Пермского национального исследовательского политехнического университета, инженер ОАО «Нью Граунд» (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, (e-mail: kuznecova_2501@mail.ru).

Лезина Ксения Сергеевна (Пермь, Россия) – магистрант кафедры «Строительное производство и геотехника» Пермского национального исследовательского политехнического университета, инженер ОАО «Нью Граунд» (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, (e-mail: ino4ka0@yandex.ru).

Маковецкий Олег Александрович (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры «Строительное производство и геотехника» Пермского национального исследовательского политехнического университета, заместитель директора по науке ОАО «Нью Граунд» (614019, Россия, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: oleg-mak@inbox.ru).

Хусаинов Ильгиз Ильдусович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Строительные конструкции и вычислительная механика» Пермского национального исследовательского политехнического университета, ведущий специалист ОАО «Нью Граунд» (614019, Россия, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: ihi888@mail.ru).

About the authors

Maria M. Karnayhova (Perm, Russian Federation) – Master Student, Department of Construction Technology and Geotechnics, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, Russian Federation, e-mail: mariakarnaukhova3443@gmail.com).

Valeria A. Kashevarova (Perm, Russian Federation) – Master Student, Department of Construction Technology and Geotechnics, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, Russian Federation, e-mail: kashevarovava@gmail.com).

Iulia A. Kuznetcova (Perm, Russian Federation) – Master Student, Department of Construction Production and Geotechnics, Perm National Research Polytechnic University, Engineer, Company “New Ground” (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, Russian Federation, e-mail: kuznecova_2501@mail.ru).

Kseniya S. Lezina (Perm, Russian Federation) – Master Student, Department of Construction Production and Geotechnics, Perm National Research Polytechnic University, Engineer, Company “New Ground” (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, Russian Federation, e-mail: ino4ka0@yandex.ru).

Oleg A. Makovetskiy (Perm, Russian Federation) – Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor, Department of Construction Production and Geotechnics, Perm National Research Polytechnic University, Vice Director, Company “New Ground” (29, Komsomolsky av., Perm, 614019, Russian Federation, e-mail: oleg-mak@inbox.ru).

Ilgiz I. Husainov (Perm, Russian Federation) – Ph.D. in Technical Sciences, Department of Building Structures and Computational Mechanics, Perm National Research Polytechnic University, Leading Specialist, Company “New Ground” (29, Komsomolsky av., Perm, 614019, Russian Federation, e-mail: ihi888@mail.ru).