

DOI: 10.15593/24111678/2017.03.08

УДК 624.138.1

О.А. Маковецкий^{1, 2}

¹Пермский национальный исследовательский
политехнический университет, Пермь, Россия

²ОАО «Нью Граунд», Пермь, Россия

АНАЛИЗ ИЗМЕНЕНИЯ СЕЙСМИЧЕСКОЙ ЖЕСТКОСТИ ОСНОВАНИЯ В СИСТЕМЕ ГРУНТОБЕТОННЫХ ГЕОТЕХНИЧЕСКИХ БАРЬЕРОВ

Традиционные методы защиты сооружений от сейсмических воздействий условно могут быть разделены на две группы: защита от проникновения поверхностных волн Рэлея и Лява как несущих основную часть сейсмической (вибрационной) энергии к защищаемым объектам; конструктивные решения, направленные на создание сейсмостойких сооружений.

Приведенный в статье анализ показывает, что влияние приповерхностных слоев из-за явлений дифракции и интерференции сейсмических волн и проявления резонансных свойств приповерхностных грунтовых слоев может приводить как к уменьшению уровня интенсивности землетрясения на 2–3 балла, так и, наоборот, к увеличению интенсивности сейсмических волн на 2–3 балла. Система грунтобетонных геотехнических барьеров является одним из методов изменения сейсмической жесткости основания площадки строительства и обеспечения техногенной безопасности. Внедрение в слабые водонасыщенные грунты верхней десятиметровой зоны грунтового основания жестких грунтобетонных элементов создает эффект «сейсмического дренажа». Скорость прохождения поперечной волны в них значительно больше, чем в окружающем грунте, что, в свою очередь, приводит к тому, что на грунт расходуется меньшая часть энергии сейсмического процесса.

Площадки с сейсмичностью 8 баллов не применимы для строительства высотных зданий. Для снижения сейсмичности площадки строительства с 8 до 7 баллов предложен горизонтальный геотехнический барьер из вертикальных грунтобетонных элементов. Устройство таких вертикальных армирующих элементов приводит к эффекту обжатия грунта и ограничению возможности и абсолютной величины его объемных деформаций при воздействии сейсмической волны.

В ходе микросейсмораионирования площадки строительства до и после выполнения горизонтального грунтобетонного геотехнического барьера экспериментально доказано, что его устройство ведет к существенному возрастанию сейсмической жесткости площадки строительства, что позволяет снизить ее категоричность и обеспечить нормативную и фактическую возможность строительства зданий большой этажности, а также восприятие передачи давлений на основание от высоконагруженных фундаментов.

Ключевые слова: поверхностные сейсмические волны, грунтобетонный геотехнический барьер, сейсмическое микрораионирование, сейсмическая жесткость.

О.А. Makovetskii^{1, 2}

¹Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

²Company «New Ground», Perm, Russian Federation

ANALYSIS MODIFICATION OF SEISMIC RIGIDITY OF THE FOUNDATION IN SYSTEM OF GEOTECHNICAL BARRIERS

Area with seismicity of 8 points is not applicable for the construction of high-rise buildings. To reduce the seismicity of the construction site from 8 points to 7 points were proposed horizontal geotechnical barrier of the vertical gruntovedenie elements. The device of such vertical reinforcing elements

leads to the effect of compression of the soil and limit your ability and the absolute value of its volume strains under the influence of a seismic wave. It is experimentally shown that the device is horizontal geotechnical barrier leads to a significant increase in seismic rigidity of the construction site, thus reducing its grade and provide a legal and factual possibility of construction of high-rise buildings, and the perception of transmission of pressure to the base of the highly loaded foundations.

Keywords: surface seismic waves, jet-grouting geotechnical barrier, the seismic mikroraionirovanie, seismic stiffness.

Устройство системы геотехнических барьеров в сейсмических районах рассматривается в двух аспектах: с точки зрения снижения сейсмичности (балльности) за счет применения сейсмичности площадки строительства и с точки зрения повышения сейсмической жесткости основания.

Геологические особенности поверхностного слоя грунтов существенно влияют на характер распространения сейсмических волн, развитие повреждений и общую сохранность здания. Анализ литературных источников [1, 2] показывает, что влияние приповерхностных слоев из-за явлений дифракции и интерференции сейсмических волн и проявления резонансных свойств приповерхностных грунтовых слоев может приводить как к уменьшению уровня интенсивности землетрясения на 2–3 балла, так и, наоборот, к увеличению интенсивности сейсмических волн на 2–3 балла.

Дисперсные грунты под действием динамических нагрузок могут проявлять следующие типы реакций: увеличение сжимаемости по сравнению со статическим режимом нагружения (виброкомпрессия); накопление сдвиговых и объемных деформаций при длительных вибрационных нагрузках (виброползучесть); динамическое разжижение водонасыщенных грунтов.

Районирование сейсмических территорий по грунтовым условиям выполняется с использованием метода сейсмических жесткостей. Оценка приращения балльности по этому методу основана на сравнении сейсмических жесткостей (произведения скоростей прохождения поперечных волн на плотность грунта) для изучаемых и эталонных грунтов, при этом учитываются поправки на обводненность и резонансные явления.

Система грунтобетонных геотехнических барьеров также является одним из методов изменения сейсмической жесткости основания площадки строительства и обеспечения техногенной безопасности. Внедрение в слабые водонасыщенные грунты верхней десятиметровой зоны грунтового основания жестких грунтобетонных элементов созда-

ет эффект «сейсмического дренажа». Скорость прохождения поперечной волны в них значительно больше, чем в окружающем грунте, что, в свою очередь, приводит к тому, что на грунт расходуется меньшая часть энергии сейсмического процесса [3].

Экспериментальные исследования последних десятилетий (В.А. Ильичев, Ю.В. Монголов и др.) показали, что физическая и геометрическая структуры системы приповерхностных слоев, общая толщина которых составляет порядка десятков метров, также могут оказывать существенное влияние на интенсивность сейсмических волн [4, 5]. Получается, что нужного для нас результата можно добиться, работая в приповерхностной зоне.

При этом рассматривается уменьшение интенсивности сейсмических нагрузок за счет взаимодействия горизонтальных слоев грунта [6]. При анализе эффективности защитных свойств барьеров различных видов большое внимание уделяется соотношению сопротивлению барьера и грунта. Сопротивление Z определяется по формуле

$$Z = c \cdot \rho, \quad (1)$$

где c – скорость распространения волн; ρ – плотность материала.

Отражение распространяющихся волн зависит от разницы в сопротивлениях грунта и материала, из которого сделан геотехнический барьер. Распространяющаяся энергия колебаний может быть представлена как коэффициент прохождения энергии E_n :

$$E_n = \frac{4Z_1Z_2}{(Z_1 + Z_2)^2}, \quad (2)$$

где Z_1 и Z_2 – сопротивления грунта и барьера соответственно.

А.М. Уздиным [7] предложены безразмерные параметры, определяющие взаимодействие сооружения с основанием: относительная жесткость сооружения $C_0 = C / G$, где C – жесткость сооружения, G – модуль сдвига основания; и \varkappa – коэффициент, определяющий соотношение между сдвиговой и поворотной жесткостью фундамента, определяемый выражением

$$\varkappa = \frac{K_x h^2}{K_\phi}, \quad (3)$$

где K_x, K_ϕ – сдвиговая и поворотная жесткости фундамента; h – расстояние от центра тяжести фундамента до его подошвы.

Для крупных массивных сооружений значительной высоты (высотных зданий) с $\kappa > 1$ существенную роль играют поворотные колебания сооружения, их влияние возрастает с повышением этого параметра. В этом случае рассеивание энергии в системе «основание – сооружение» определяется ее излучением в основании упругими волнами и гистерезисом в грунте. При больших значениях C_0 преобладающими являются поворотные колебания сооружения как жесткого целого, а потери энергии определяются гистерезисом в грунте, при малых значениях C_0 преобладают изгибные колебания сооружения.

В работах В.А. Ильичева [8, 9] исследовалась задача о нестационарных горизонтальных, вертикальных и вращательных колебаниях фундамента, лежащего на грунте, с учетом возникновения и распространения упругих волн в грунтовом основании, причем моделью основания являлось однородное упругое изотропное полупространство, а сам фундамент представлялся в виде твердого массивного тела.

На основании сравнения импульсно-переходных функций упругого полупространства и упрощенных механических моделей была предложена приближенная расчетная модель (рис. 1), учитывающая движение прилегающего к сооружению грунта.

В последующих исследованиях В.А. Ильичев и А.В. Аникьев дали приближенные решения описанной задачи [10], сведя сложные математические выражения к простым механическим моделям, учтя в них одну из главных особенностей прилегающего к сооружению грунта – подвижность относительно и сооружения, и остального грунта.

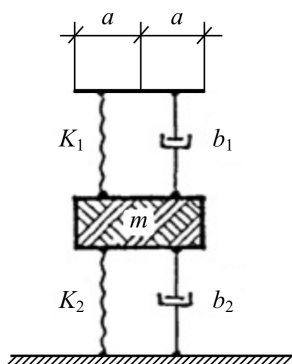


Рис. 1. Динамическая расчетная модель:
 K_1 и K_2 – коэффициенты жесткости основания;
 b_1 и b_2 – коэффициенты рассеивания энергии;
 m – масса прилегающего подвижного грунта

В работе [11] была предложена методика численного моделирования, дающая возможность определить размеры площадей, на которых необходимо проводить устройство искусственного основания в слабых водонасыщенных грунтах, а также способы его устройства, позволяющие перевести грунты третьей категории сейсмичности во вторую, согласно СП 14.13330.2011 «Строительство в сейсмических районах». Движение квазидвухфазной среды при сейсмическом воздействии описывается системой уравнений динамической консолидации

$$\left\{ \begin{array}{l} m_s \rho_s \ddot{u}_i + (1 - m_s) \rho_w u_i^w = \delta_{ij} \rho g + \sigma_{ij}^{ef} + \delta_{ij} p_j^w, \\ \dot{u}_{ij}^w - u_i = \frac{k_f}{1 - m_s} \left[\delta_{ij} \frac{p_j^w}{g \rho_w} + \delta_{i2} - \frac{\ddot{u}_i^w}{g} \right], \\ \ddot{u}_{i,i}^w + \frac{m_s}{1 - m_s} u_{i,i} = \frac{1}{M} p^w, \end{array} \right. \quad (4)$$

где σ_{ij}^{ef} – тензор эффективных напряжения в скелете грунта; p_j^w – нейтральное давление в поровой воде; δ_{ij} – символ Кронекера; m_s – отношение объема частиц грунта к общему объему грунта; ρ, ρ_s, ρ_w – плотность грунта, минеральных частиц грунта и поровой воды соответственно; $\ddot{u}_i, \dot{u}_i, \ddot{u}_i^w, \dot{u}_i^w$ – ускорение и скорость движения скелета и поровой воды по i -му направлению соответственно; k_f – коэффициент фильтрации; M – коэффициент сжимаемости смеси воды и воздуха; g – ускорение свободного падения.

При численной реализации решения системы уравнений методом конечных элементов выделяется ограниченная расчетная область. Для моделирования полубесконечной области определяются граничные условия, позволяющие волнам обходить границу без отражения, а также области повышенной жесткости искусственного основания и уровень подземных вод.

В результате численного моделирования находятся оптимальные характеристики искусственного основания, наиболее эффективно снижающие балльность площадки строительства.

Количественная оценка надежности геотехнического барьера с учетом сейсмического фактора может быть получена в условиях квазистатического спектрального метода [12, 13]. Согласно этому методу

сейсмические инерционные нагрузки и вызываемые ими перемещения рассматриваются как случайные величины (обусловленные разбросом параметров грунта), подчиненные нормальному закону. Основными техническими параметрами грунтов, которые описывают функции «перемещение – усилие», являются начальные коэффициенты жесткости основания. В.А. Ильичевым, Ю.В. Монголовым и В.М. Шаевичем разработана динамическая модель свайного основания, позволяющая аналитически вычислить коэффициенты жесткости при упругом равномерном сдвиге и упругом повороте в зависимости от глубины погружения жестких включений в грунт.

Из результатов представленного сопоставительного анализа конструктивных возможностей волновых завес вытекает, что практический интерес представляют лишь горизонтальные барьеры – искусственные основания. Однако для широкого практического применения волновых завес не хватает экспериментальных данных и 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 силовое воздействие и несущие свойства строительной системы.

Это предположение было экспериментально проверено в геологических условиях Краснодарского края. В ходе выполнения инженерно-геологических изысканий на площадке строительства высотного жилого комплекса было выполнено сейсмическое микрорайонирование в ходе инженерно-геологических изысканий и после устройства «структурного геомассива».

Инженерно-геологические условия были следующими: в геоморфологическом отношении исследуемый участок располагается в пределах правобережной поймы реки Кубань.

Геолого-литологический разрез площадки на глубину 25 м (сверху вниз): ИГЭ-3 – глина (aQ_{IV}) полутвердой консистенции, с прослойками песка мелкого водонасыщенного, с включением органики до 5 %, мощность слоя – от 1,5 до 2,7 м; ИГЭ-4 – супесь (aQ_{IV}) пластичная, с прослоями песка мелкого, насыщенного водой до 10 см, глины мягкопластичной, мощность слоя – от 1,8 до 2,0 м; ИГЭ-5 – глина (aQ_{IV}) тугопластичная, с включением органики до 5 %, с прослоями песка мелкого, водонасыщенного, мощность слоя – от 3,0 до 4,7 м; ИГЭ-6 – глина (aQ_{IV}) текучая, с включением органики до 20 %, с прослоями

песка мелкого, водонасыщенного, мощность слоя – от 1,0 до 2,7 м; ИГЭ-7 – песок (aQ_{IV}) средней крупности, средней плотности, насыщенный водой, вскрыт с глубины 11,7–12,0 м до разведанных 25,0 м. Категории грунтов по сейсмическим свойствам: ИГЭ-3, ИГЭ-5, ИГЭ-7 – II (вторая); ИГЭ-4, ИГЭ-6 – III (третья).

Исходная сейсмичность участка исследований выбрана в соответствии с картой ОСР-97-А – 7 баллов. Геофизические исследования на изучаемой площадке проведены методами сейморазведки КМПВ (корреляционный метод преломленных волн) с использованием преломленных и преломленно-рефрагированных волн для детального изучения верхней части разреза. Размещение сейсмических профилей выполнялось с учетом расположения горных выработок, чтобы последующая качественная и количественная интерпретация выполнялась комплексно.

Наблюдения проводились по схемам ZZ (вертикально направленные удары и прием на вертикальных сейсмоприемниках) и YY (горизонтально направленные перпендикулярно линии профиля удары и прием на горизонтальных сейсмоприемниках). Профили были отработаны по 9-точечной системе наблюдения для расстановки длиной 57,5 м. Расстояние между пунктами возбуждения (ПВ) составляло 5,0–7,5 м, база приема – 57,5 м, шаг между пунктами приема (ПП) – 2,5 м, на каждом ПП устанавливался один сейсмоприемник. В качестве регистрирующей аппаратуры использовалась сертифицированная 24-канальная 24-разрядная цифровая сеймостанция SGD-SEL/24E (рис. 2, а), в состав которой входили регистратор с программным обеспечением, сейсмическая коса, сейсмоприемники. Время регистрации составляло 512–1024 мс. Время дискретизации – 0,25–0,5 мс. Возбуждение колебаний производилось посредством ударов кувалдой (тампером) массой 5 кг по металлической плашке $20,0 \times 20,0 \times 1,0$ см с накоплением в каждом пункте от 10 до 24 раз. Для возбуждения SH-поляризованных волн производились разнонаправленные удары вкрест профиля по вертикальным стенкам шурфа. Для регистрации сейсмических сигналов использовались сейсмоприемники GS-20DX, обладающие частотной характеристикой с собственной частотой 10 Гц и обеспечивающие надежный прием регистрируемых сигналов. Эта частота обеспечивает равномерность в полосе частот 10–500 Гц, что дает возможность принимать в неискаженном виде колебания от описанных выше источников продольных и поперечных SH-волн.

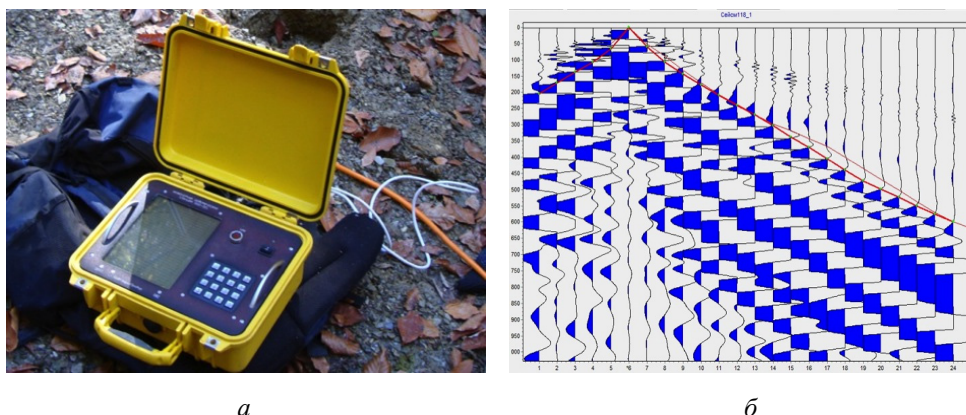


Рис. 2. Цифровая инженерная сейсмостанция (а);
сейсмограмма поперечной волны (б)

На рис. 2, б представлена сейсмограмма записи по схеме УУ, зарегистрированная на пикетах наблюдения ПК0-57.5 при ударах на ПК57.5, на которой прослеживаются вступления поперечной S-волны. На объекте исследования было отработано пять сейсмозондирований. В результате обработки сейсморазведочных материалов были получены сведения о скоростях распространения продольных и поперечных сейсмических волн в грунтах верхней части разреза на всей территории исследования (табл. 1).

Таблица 1

Опытные данные скоростей

Инженерно-геологический элемент	Плотность, кН/м^3	Модуль деформаций, МПа	V_s теор, м/с	V_s эксп, м/с
ИГЭ-2, глина твердая	19,1	12,0	190	87–150
ИГЭ-3, глина полутвердая	19,5	11,0	208	160–190
ИГЭ-4, супесь пластичная	19,9	4,0	124	110–118
ИГЭ-5, глина тугопластичная	18,8	5,0	143	140–160
ИГЭ-6, глина текучая	16,3	3,0	118	89–112
ИГЭ-7, песок водонасыщенный	20,6	22,0	286	260–310

В соответствии с данными анализа за «средний» грунт были приняты грунты, представленные суглинистыми отложениями, характеризующимися для верхней 10-метровой толщи следующими средними параметрами: плотность $\rho_c = 1,95 \text{ т/м}^3$; скорости продольных волн $V_p = 500\text{--}700 \text{ м/с}$; скорости распространения поперечных волн

$V_s = 250\text{--}300$ м/с; коэффициент крепости по М.М. Протодяконову $f_{крс} = 0,75$.

Расчеты приращений $\Delta J_{ж}$ по средним значениям сейсмических жесткостей (V_p) для верхней 10-метровой толщи были выполнены в соответствии с зависимостью С.В. Медведева [14]

$$\Delta J_{ж} = 1,67g (V_{срс}/V_{и\rho_{и}}), \quad (5)$$

где $V_{срс}$ – сейсмическая жесткость «среднего» грунта; $V_{и\rho_{и}}$ – сейсмическая жесткость грунта в исследуемом пункте.

Приращения сейсмичности, обусловленные обводненностью в грунте $\Delta J_{в}$ на глубинах h до 10 м ($\Delta J_{в}$), определялись по зависимости С.В. Медведева

$$\Delta J_{в} = e^{-0,04h} \cdot k, \quad (6)$$

где h – глубина уровня грунтовых вод; k – понижающий коэффициент, для твердых, полутвердых и тугопластичных глин и суглинков и крупнообломочных грунтов, принимаемый равным 0,5.

Были определены значения скоростей V_s для различных инженерно-геологических элементов. По величинам V_s и ρ были рассчитаны приращения сейсмичности, обусловленные сейсмической жесткостью грунтов $\Delta J_{ж}$, а также их обводненностью $\Delta J_{в}$. Результаты расчетов сведены в табл. 2. Приращения сейсмичности, рассчитанные для грунтов, слагающих площадку, относительно эталонного грунта с учетом их обводненности составили $\Delta J_{ж} = 0,76\text{--}1,00$. В соответствии с методом сейсмических жесткостей сейсмичность площадки составляет 7,8–8 баллов по карте ОСР-97А, по шкале MSK-64 для повторяемости таких сотрясений – 1 раз в 500 лет.

Площадки с сейсмичностью 8 баллов не применимы для строительства высотных зданий. Для снижения сейсмичности площадки строительства с 8 до 7 баллов требуется изменение массива грунтов ИГЭ-4, ИГЭ-6 для перевода их из III во II категорию по сейсмическим свойствам. С этой целью был предложен горизонтальный геотехнический барьер из вертикальных грунтобетонных элементов. Устройство таких вертикальных армирующих элементов приводит к эффекту обжатия грунта и ограничению возможности и абсолютной величины его объемных деформаций при воздействии сейсми-

ческой волны. В этих условиях не возникают явления «вибродразжижения» и «виброползучести» [15].

Проектные физико-механические характеристики грунтобетонных элементов приведены в табл. 2. Скорость распространения поперечной волны в грунтобетоне установлена в ходе опытов по определению длины элементов геофизическими методами.

Таблица 2

Физико-механические характеристики грунтобетона

Материал ствола элемента	Удельный вес γ_n , т/м ³	Кoeffи- циент пористости e	Скорость поперечной волны V_s , м/с	Прочность на одноос- ное сжатие $R_{гц}$, МПа	Модуль деформа- ции $E_{гц}$, МПа	Кoeffи- циент Пуассона ν
Грунтобетон	1,8	0,5	800,0	1,5	200	0,3

Эффективную скорость распространения поперечной сейсмической волны в геотехническом барьере определим исходя из выражения

$$V_s = (G / \gamma)^{0,5}, \quad (7)$$

где G – модуль сдвига; γ – удельный вес.

Эффективный модуль сдвига «структурного геомассива» $G_{эф}$ вычислим по формуле

$$G_{эф} = \frac{k_1 E_{эф}}{(1 + \nu)}, \quad (8)$$

где $E_{эф}$ – эффективный модуль деформации «структурного геомассива»; k_1 – коэффициент перехода к эффективному модулю упругости, $k_1 = 60$; ν – коэффициент Пуассона.

Подставив выражение (8) в формулу (7), получим зависимость скорости распространения сейсмической волны в «структурном геомассиве» от эффективного модуля деформации:

$$V_s = \left(\frac{k_1 E_{эф}}{\gamma(1 + \nu)} \right)^{0,5}. \quad (9)$$

Проектные эффективные физико-механические характеристики горизонтального геотехнического барьера приведены в табл. 3.

Таблица 3

Проектные эффективные характеристики «структурного геомассива»

Номер ИГЭ закрепленного грунта	Удельный вес γ_n , т/м ³	Коэффициент пористости e	Скорость поперечной волны V_s , м/с	Модуль деформации $E_{гм}$, МПа	Коэффициент Пуассона ν
ИГЭ-3*	1,86	0,607	505	107,0	0,35
ИГЭ-4*	1,86	0,606	500	105,0	0,35
ИГЭ-5*	1,82	0,693	507	105,5	0,35
ИГЭ-6*	1,67	0,665	527	104,5	0,35
ИГЭ-7*	1,91	0,492	514	113,8	0,35

Размеры геотехнического барьера в плане выходили на 3 м за контур проектируемого здания, нижняя граница геотехнического барьера была принята из условия достижения более плотных грунтов II категории по сейсмичности (ИГЭ-7) и обеспечения деформаций здания в допустимых пределах.

После выполнения работ по устройству «структурного геомассива» был выполнен второй этап определения сейсмической жесткости и балльности площадки по методике сейсморазведочных работ на волнах Рэлея.

Для детального изучения скоростных характеристик разреза было принято решение отработать профиль по продольным и поперечным рефрагированным волнам, а также по волнам Рэлея (рис. 3, а, б).

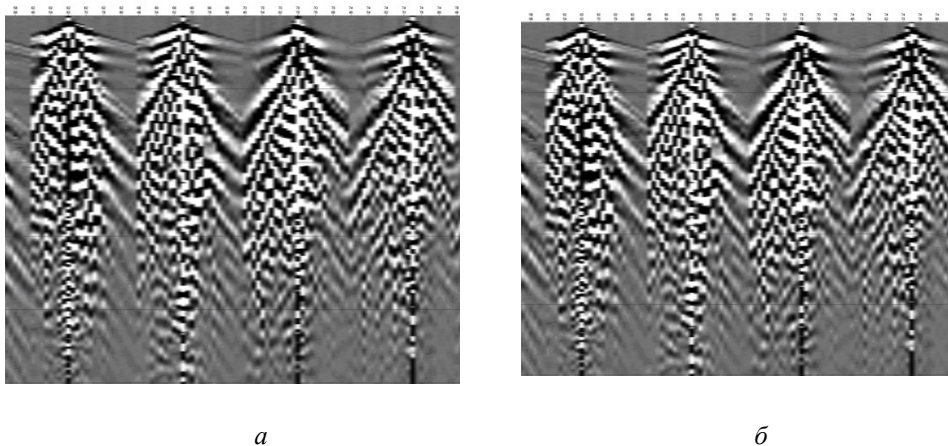


Рис. 3. Полевая сейсмограмма волнового поля:
 а – вертикальные сейсмоприемники; б – горизонтальные сейсмоприемники

На записи отчетливо видны рефрагированные в системе армирующих элементов P и S_v волны, а также волны Рэлея в последующих вступлениях. При поверхностном возбуждении упругих колебаний более $2/3$ части энергии уходит на образование низкоскоростных поверхностных волн Рэлея. В случае вертикального градиента скоростей каждая частотная компонента поверхностной волны распространяется со своей фазовой скоростью, т.е. скорость поверхностной волны является функцией частоты колебаний. Глубина, на которую распространяются колебания поверхностной волны, пропорциональна длине волны (или обратно пропорциональна частоте). С учетом низкой разрешающей способности разреза и фактической невозможности получить скорости поперечных волн наземными методами в условиях г. Краснодара поперечные волны были получены методом обработки поверхностных волн [16, 17].

Полученные сейсмограммы привлекались для дальнейшего анализа волнового поля. Скорости поперечных волн были получены в полевых условиях. График изменения скорости (рис. 4) продольных и поперечных волн с глубиной был построен на основе следующего принципа: для каждого из расчетных слоев грунта определялись средние скорости в пределах выделенных ИГЭ известной мощности. С учетом того, что изменчивость скоростей в плане в пределах верхней части разреза незначительна (границы субгоризонтальны дневной поверхности), значения скоростей для общей модели фактически соответствуют средним значениям по глубинам.

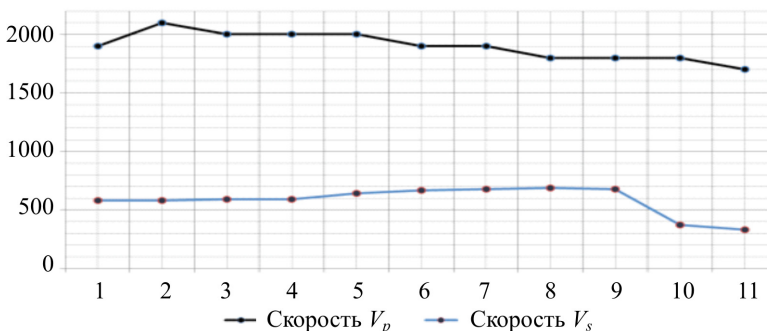


Рис. 4. Средневзвешенная скоростная модель основания

Скоростные модели распространения продольных и поперечных сейсмических волн в вертикальной плоскости (профиль 1–1) в пределах «структурного геомассива» показаны на рис. 5, 6. Расчетное значе-

ние скорости прохождения поперечной сейсмической волны (V_s) составляло 500–520 м/с, экспериментальное значение – 590–635 м/с. По результатам испытаний был уточнен коэффициент перехода от эффективного модуля деформации геотехнического барьера к величине скорости продольной волны. Проведенные полевые эксперименты показали удовлетворительную сходимость расчетных и измеренных скоростей распространения поперечных сейсмических волн в пределах зоны «структурного геомассива».

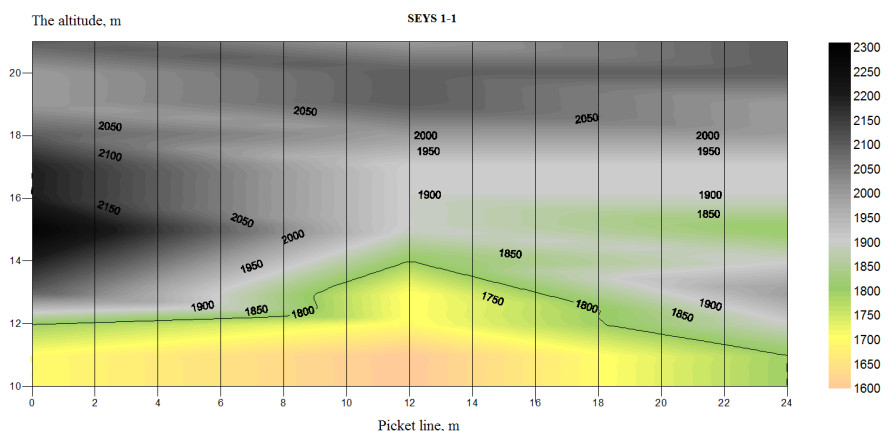


Рис. 5. Профиль 1–1. Скоростная модель продольных волн

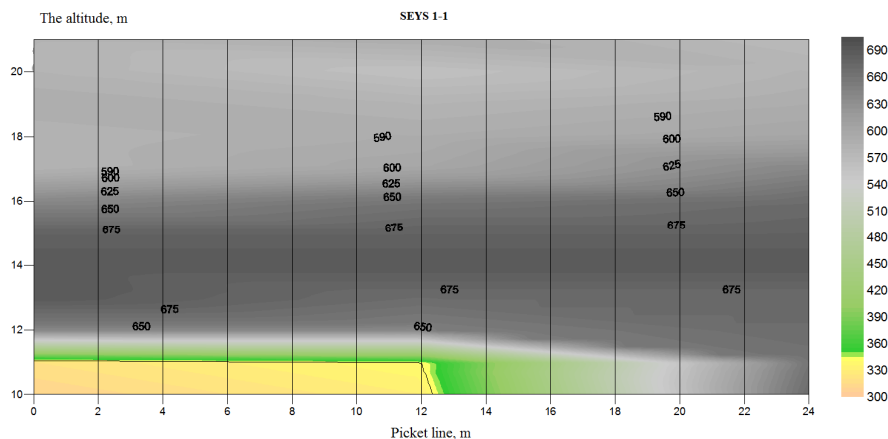


Рис. 6. Профиль 1–1. Скоростная модель поперечных волн

По результатам сейсмического зондирования были выделены сейсмогеологические элементы, и для них были рассчитаны прираще- ния интенсивности (табл. 4, 5).

Таблица 4

 Сейсмогеологическая модель на профиле 1–1 относительно
 дневной поверхности (ПК-24)

№ СГ № Э ИГЭ	Литологическое описание грунтов	Категория грунта по сейсмическим свойствам	Глубина до подошвы, м	Мощность слоя, м	Коэффициент K	УПВ	V_s , м/с	V_s , СГМ	Плотность, г/см	Плотность, СГМ
2-4	Глины полутвердые с прослоем супеси пластичной (закреплен.)	II/III	3,8	3,8	0,75	0,0	580	635,8	1,95	1,91
5, 6	Глины тугопластич. и текучие (закреплен.)	III	10,0	6,2	1,0		670		1,88	

Таблица 5

Расчет приращения сейсмической интенсивности

Приращение (акустическая жесткость)					Приращение (обводнение)			
V_s , м/с	V_s эталон, м/с	Плотность, СГМ	Плотность, эталон	Приращение интенсивности	УПВ	K (РСН 65-87)	Приращение интенсивности	Расчетная интенсивность
635,8	320	1,91	1,83	-0,51	0,0	0,91	0,91	7,00

С учетом инженерно-геологических условий площадки проектируемого строительства максимальное приращение интенсивности по методу сейсмических жесткостей составило +0,4 балла относительно дневной поверхности. Итоговая сейсмичность площадки по карте А по методу сейсмических жесткостей составила 7,0 баллов для сооружений нормального уровня ответственности по карте ОСР-97А ($T = 500$) с учетом произведенной подготовки оснований.

Экспериментально показано, что устройство горизонтального геотехнического барьера в виде структурного геомассива приводит к существенному возрастанию сейсмической жесткости площадки строитель-

ства, что позволяет снизить ее категоричность и обеспечить нормативную и фактическую возможность строительства зданий большой этажности, а также восприятие передачи давлений на основание от высоконагруженных фундаментов. На основе экспериментальной зависимости «эффективный модуль деформации – скорость распространения поперечной сейсмической волны» возможно оценивать объем необходимых мероприятий по снижению сейсмичности площадок строительства.

Список литературы

1. Гусев Е.Л. Задачи оптимального выбора физической и геометрической структуры слоисто-неоднородных композитных конструкции при наклонном падении упругих волн. Часть I // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. – 2012. – № 1. – С. 26–31.
2. Taucer F., Apostolska R. Experimental research in earthquake engineering. – Springer, 2015. – 624 p.
3. Ground improvement / М.Р. Moseley [et al.]. – London, 2004. – 440 p.
4. Изменение сейсмических свойств лессовых грунтов при инженерной подготовке территории / В.А. Ильичев [и др.] // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 1989. – № 3. – С. 13–15.
5. Ильичев В.А. К оценке коэффициента демпфирования основания фундаментов, совершающих вертикальные колебания // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 1981. – № 4. – С. 22–26.
6. Червинский Я.И., Моргунова Н.В. Исследование влияния искусственного преобразования грунтовых массивов на сейсмичность площадок строительство зданий // Будівельни конструкції: міжвідомчий науково-технічний збірник. – Киев, 2008. – Вип. 69. – С. 347–352.
7. Уздин А.М., Сандович Т.А., Аль-Насер-Мохомад Самих Амин. Основы теории сейсмостойкости и сейсмостойкого строительства зданий и сооружений. – СПб.: Изд-во ВНИИГ им. Веденеева, 1993. – 176 с.
8. Ильичев В.А. Особенности взаимодействия с грунтом больше-размерных фундаментов при сейсмических воздействиях // Сейсмостойкое строительство. – М., 1975. – Вып. 2. – С. 89–102.
9. Ильичев В.А., Монголов Ю.В., Шаевич В.М. Свайные фундаменты в сейсмических районах. – М.: Стройиздат, 1983. – 144 с.
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., Лиховцев В.М., Курдюк А.Ю. Методика оценки сейсмичности искусственного водонасыщенного основания на основе конечно-элементных исследований // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 1990. – № 1. – С. 7–9.

12. Бирбаер А.Н., Шульман С.Г. Оценка надежности свайных фундаментов при сейсмических воздействиях // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 1986. – № 1. – С. 15–18.

13. Phoon Kok-Kwang. Reliability of geotechnical structures in ISO2394. – Matieland, South Africa, 2016. – 249 p.

14. Назаров Г.Н., Шемшурин В.А. Использование инженерно-геологических характеристик при сейсмическом микрорайонировании. Сейсмическое микрорайонирование. – М.: Наука, 1977. – 98 с.

15. IREX Recommendations pour la conception, le dimensionnement, l'exécution et le contrôle de l'amélioration des sols de fondation par inclusions rigides, 2012, ASIRI 384, Presses des Ponts. – 317 p.

16. Маковецкий О.А., Зуев С.С., Хусаинов И.И. Применение струйной цементации для устройства подземных частей комплексов // Жилищное строительство. – 2013. – № 9. – С. 10–14.

17. Constable A.C., Parker R.L., Constable C.G. Occam's inversion: a practical algorithm for generating smooth models from electro-magnetic sounding data // Geophysics. – 1987. – № 52 (3). – P. 289–300.

References

1. Gusev E.L. Zadachi optimalnogo vyibora fizicheskoy i geometricheskoy strukturyi sloisto-neodnorodnyih kompozitnyih konstruktsiy pri naklonnom padenii uprugih voln. [The optimal choice of physical and geometric structure of the layered composite structures with a sloping drop of elastic waves.] Chast I. *Seysmostoykoe stroitelstvo. Bezopasnost sooruzheniy*, 2012, no. 1, pp. 26-31.

2. Taucer F., Apostolska R. Experimental research in Earthquake Engineering. Springer, 2015, 624 p.

3. Moseley M.P. et.al. Ground improvement. London, 2004, 440 p.

4. Ilichev V.A. et al. Izmenenie seysmicheskikh svoystv lessovyih gruntov pri inzhenernoy podgotovke territorii [The change of seismic properties of loess soils for engineering preparation of the territory]. *Osnovaniya, fundamenty i mehanika gruntov*, 1989, no. 3, pp. 13-15.

5. Ilichev V.A. K otsenke koeffitsienta dempfirovaniya osnovaniya fundamentov, sovershayuschih vertikalnyie kolebaniya [To estimate the

damping ratio of the Foundation base, making vertical vibrations]. *Osnovaniya, fundamenty i mehanika gruntov*, 1981, no. 4, pp. 22-26.

6. Chervinskiy Ya.I., Morgunova N.V. Issledovanie vliyaniya iskusstvennogo preobrazovaniya gruntovyih massivov na seysmichnost ploschadok stroitelstvo zdaniy [Study of the effect of artificial transformation of soil layers on seismic platforms for the construction of buildings]. *Budivelni konstruktsii. Mizhvidomchiy naukovno-tehnichniy zbirnik*, 2008, iss. 69, pp. 347-352.

7. Uzdin A.M., Sandovich T.A., Al-Naser-Mohomad Samih Amin Osnovyi teorii seysmostoykosti i seysmostoykogo stroitelstva zdaniy i sooruzheniy. [Fundamentals of the theory of seismic stability and earthquake-resistant construction of buildings and structures]. Saint Peterburg, Izdatel'stvo VNIIG im. Vedeeneeva, 1993, 176 p.

8. Ilichev V.A. Osobennosti vzaimodeystviya s gruntom bolsherazmernyih fundamentov pri seysmicheskikh vozdeystviyah [The peculiarities of interaction with the ground of large foundations under seismic loading]. *Seysmostoykoe stroitelstvo*, 1975, iss. 2, pp. 89-102.

9. Ilichev V.A., Mongolov Yu.V., Shaevich V.M. Svaynyie fundamenty v seysmicheskikh rayonah [Pile foundations in seismic regions], Stroyizdat, 1983, 144 p.

10. Ilichev V.A., Anikev A.V. Nestatsionarnyye gorizontalnyie kolebaniya fundamenta s uchedom volnovogo vzaimodeystviya s gruntovyim osnovaniem. [Unsteady horizontal oscillations of the Foundation, taking into account wave interaction with a soil base] *Osnovaniya, fundamenty i mehanika gruntov*, 1980, no. 4, pp. 20-24.

11. Ilichev V.A. Lihovtsev V.M., Kurdyuk A.Yu. Metodika otsenki seysmichnosti iskusstvennogo vodonasyischennogo osnovaniya na osnove konechno-elementnyih issledovaniy [Methods of assessment of seismicity artificial water-saturated grounds on the basis of finite element studies]. *Osnovaniya, fundamenty i mehanika gruntov*, 1990, no. 1, p. 7-9.

12. Birbaer A.N., Shulman S.G. Otsenka nadezhnosti svaynyih fundamentov pri seysmicheskikh vozdeystviyah [Evaluation of the reliability of pile foundations under seismic loading]. *Osnovaniya, fundamenty i mehanika gruntov*, 1986, no. 1, pp. 15-18.

13. Phoon Kok-Kwang. Reliability of geotechnical structures in ISO2394. Ed. K.K. Phoon, J.V. Retief. Matieland, South Africa, 2016, 249 p.

14. Nazarov G.N., Shemshurin V.A. Ispolzovanie inzhenerno-geologicheskikh harakteristik pri seysmicheskome mikrorayonirovanii [The use of

geotechnical characteristics under seismic mikroraiionirovani.]. *Seismicheskoe mikrorayonirovanie*. Moscow, Nauka, 1977, 98 p.

15. IREX Recommendations pour la conception, le dimensionnement, l'exécution et le contrôle de l'amélioration des sols de fondation par inclusions rigides, ASIRI 384, Presses des Ponts, 2012, 317 p.

16. Makovetskiy O.A., Zuev S.S., Husainov I.I. Primenenie struynoy tsementatsii dlya ustroystva podzemnyih chastey kompleksov. [The use of jet grouting for the device of underground parts of complexes]. *Zhilischnoe stroitelstvo*, 2013, no. 9. pp. 10-14.

17. Constable, A.C., Parker, R.L., Constable C.G. Occam's inversion: A practical algorithm for generating smooth models from electro-magnetic sounding data. *Geophysics*, 1987, no. 52 (3), pp. 289-300.

Получено 22.08.2017

Об авторе

Маковецкий Олег Александрович (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, доцент, заместитель директора по науке, ОАО «Нью Граунд»; доцент кафедры «Строительное производство и геотехника», Пермский национальный исследовательский политехнический университет (614019, Россия, Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: oleg-mak@inbox.ru).

About the author

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