



УДК 624.138.22:624.131.216

*О.П. Минаев*

## **ЭФФЕКТИВНЫЙ МЕТОД ЗАЩИТЫ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ ОТ ВИБРОДИНАМИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ПРИ УПЛОТНЕНИИ ГРУНТОВ БЛИЗЛЕЖАЩИХ ОСНОВАНИЙ**

*О.П. Минаев*

## **THE EFFECTIVE METHOD TO PROTECT BUILDINGS AND CONSTRUCTIONS FROM DYNAMIC VIBRATION EFFECTS BY COMPACTION OF NEARBY BOTTOM SOILS**

Вибродинамическое воздействие на водонасыщенные грунты основания провоцирует вредные воздействия на близлежащие здания и сооружения, что ограничивает условия применения глубинных методов уплотнения оснований. Их расширение может быть достигнуто путем изоляции массива, подлежащего уплотнению, экраном из аэрированного грунта. В статье приведены результаты теоретического на расчетных моделях обоснования данного метода вибродинамической защиты зданий и сооружений, а также данные лабораторных экспериментальных исследований и апробирования метода в практике виброзащиты. Опытное апробирование было впервые выполнено для защиты жилого здания от интенсивной вибрации. После аэрирования грунтов основания вибрации здания прекратились.

ВОДОНАСЫЩЕННЫЕ ОСНОВАНИЯ; ПЕСЧАНЫЕ ГРУНТЫ; ВИБРОДИНАМИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ГЛУБИННОГО УПЛОТНЕНИЯ; АЭРИРОВАНИЕ СЛОЯ ГРУНТА ОСНОВАНИЯ; АМПЛИТУДЫ И УСКОРЕНИЯ КОЛЕБАНИЙ ГРУНТА ОСНОВАНИЯ; СНИЖЕНИЕ БАЛЛЬНОСТИ; БЕЗОПАСНЫЕ РАССТОЯНИЯ ДО ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ.

The dynamic vibration impact on water-saturated bottom soils causes harmful effects on nearby buildings and structures, which limit the conditions of using in-depth methods of ground compaction. By author's assumption the possibility of their extension may be obtained by isolating array subject entitled to compaction, with a screen made of aerated soil. The article contains the theoretical study's results of the method of dynamic vibration protection of buildings and structures on the estimated models, data of laboratory experimental research and experience of its approbation in vibration protection practice. Experimental approbation was first made to protect residential building from the intense vibration. After having aerated bottom soils, vibrations of the building stopped.

WATER-SATURATED GROUNDS; SANDY SOILS; DYNAMIC VIBRATION IN-DEPTH METHODS OF COMPACTION; AERATION OF THE LAYER OF THE BOTTOM SOIL; AMPLITUDE AND SPEED-UPS OF VIBRATIONS OF THE BOTTOM SOIL; REDUCTION OF SEISMIC ACTIVITY; SAFE DISTANCE OF BUILDINGS AND CONSTRUCTIONS.

Уплотнительная застройка зданиями территорий в крупных мегаполисах получила широкое распространение в отечественной практике строительства.

При динамическом воздействии взрывов, тяжелых трамбовок и различных виброуплотнителей на водонасыщенный грунт основания в нем возникают волны, которые распространяются в толще уплотняемого массива [1–15] во все стороны от центра воздействия.

Упругие волны распространяются от места вибродинамического воздействия далеко за пределы карты уплотняемого основания. По предварительным расчетам за эти пределы уносится более половины от общей энергии излучаемой в грунт основания. Это сопровождается вредными вибродинамическими воздействиями на близлежащие здания и сооружения, что ограничивает условия применения глубинных динамических методов уплотнения оснований.

### Постановка задачи

Возникает стремление ограничить обрабатываемый грунтовый массив размерами собственно зоны уплотнения за счет создания преграды на пути распространения волн за пределы зоны уплотнения.

По предложению автора статьи это может быть достигнуто путем изоляции массива, подлежащего уплотнению, экраном из аэрированного грунта [16, 17].

Поясним вышесказанное схемой, представленной на рис. 1. В пределах рассматриваемого участка основания 1 по периметру зоны уплотнения 2 создается на заданную глубину основания экран 3, который представляет собой аэрированный грунт, обладающий упругими характеристиками, отличными от характеристик грунта зоны уплотнения. Экран 3 создают

нагнетанием в грунт воздуха с помощью погружаемой в основание вибратором 4 трубы 5, перфорированной в нижней своей части.

Воздух в виде мелких пузырьков инъецируется в грунт основания по всей высоте слоя в пределах некоторой полосы шириной  $\delta$ , что может существенно снизить модуль упругости среды в толще экрана.

После проведения операции аэрирования в зоне уплотнения 2 динамическое воздействие на грунт основания в намеченных местах б (например, сбрасыванием трамбуящего груза) будет вызывать образование отраженных волн. От эпицентра воздействия волны будут доходить до экрана 3 и отражаться от него, а волна, проходящая за зону уплотнения 2, будет иметь сниженные характеристики воздействия на грунты основания.

Таким образом, может быть обеспечена безопасность близлежащих зданий и сооружений от техногенных вибродинамических воздействий при использовании глубинных динамических методов уплотнения грунтов оснований.

Целями исследований автора статьи были: приближенная теоретическая оценка эффективности и подбор параметров предлагаемого решения для условий лабораторного эксперимента; проведение лабораторных экспериментальных исследований для определения влияния создаваемой стенки из аэрированного грунта на параметры возбуждаемых колебаний при уплотнении водонасыщенного грунта основания.

Ставилась также задача теоретического обоснования вибродинамической защиты в натуральных условиях, что и выполнено автором статьи с учетом затухания волн деформаций в зависимости от расстояния до места вибродинамического воздействия в пределах аэрированного слоя грунтов основания. Проанализированы практический опыт применения способа аэрирования водонасыщенного песчаного грунта для вибродинамической защиты близлежащих зданий и сооружений.

### Теоретическое обоснование

Для приближенной теоретической оценки эффективности и подбора параметров предлагаемого решения применительно к условиям лабораторного эксперимента была рассмотрена задача о распространении упругих волн в полубесконечном упругом стержне, содержащем

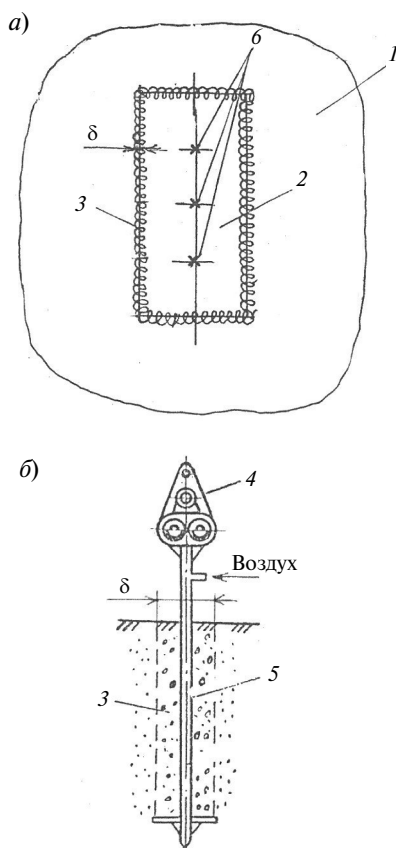


Рис. 1. Пояснительные схемы к изоляции грунтового массива путем аэрирования грунта:

*a* — план площади подготавливаемого основания; *б* — схема осуществления процесса аэрирования грунта

низкомодульную упругую вставку. Считаем, что динамическое воздействие  $P_0 f(t)$  приложено на свободном торце полубесконечного стержня (рис. 2).

Полубесконечную часть стержня, расположенную за низкомодульной вставкой, заменим эквивалентным демпфером.

Такая схематизация соответствует условию отражения упругих волн от противоположно расположенных двух стенок из аэрированного грунта, находящихся на одинаковом расстоянии от места приложения динамического воздействия.

Уравнение продольных колебаний стержня принимаем в стандартном виде:

$$c_i \frac{\partial^2 u_i(x_i, t)}{\partial x_i^2} - \frac{\partial^2 u_i(x_i, t)}{\partial t^2} = 0, \quad (1)$$

где  $c_i = \sqrt{\frac{E_i}{\rho_i}}$  — скорость распространения продольных волн деформаций в  $i$ -м стержне ( $E_i$ ,

$\rho_i$  — соответственно модуль упругости и плотность материала  $i$ -го стержня).

Граничные условия представляются следующим образом:

1) на свободном торце стержня

$$(EF)_1 \left. \frac{\partial u_1}{\partial x_1} \right|_{x_1=0} = P_0 f(t); \quad (2)$$

2) на контактирующем торце участков 1–2

$$u_1(\ell_1, t) = u_2(0, t), \quad (3)$$

$$(EF)_1 \left. \frac{\partial u_1}{\partial x_1} \right|_{x_1=\ell_1} = (EF)_2 \left. \frac{\partial u_2}{\partial x_2} \right|_{x_2=0}; \quad (4)$$

3) на контактирующем торце участков 2–3

$$(EF)_2 \left. \frac{\partial u_2}{\partial x_2} \right|_{x_2=\ell_2} = -\frac{(EF)_3}{c_3} \frac{\partial u_2}{\partial t} \Big|_{x_2=\ell_2}. \quad (5)$$

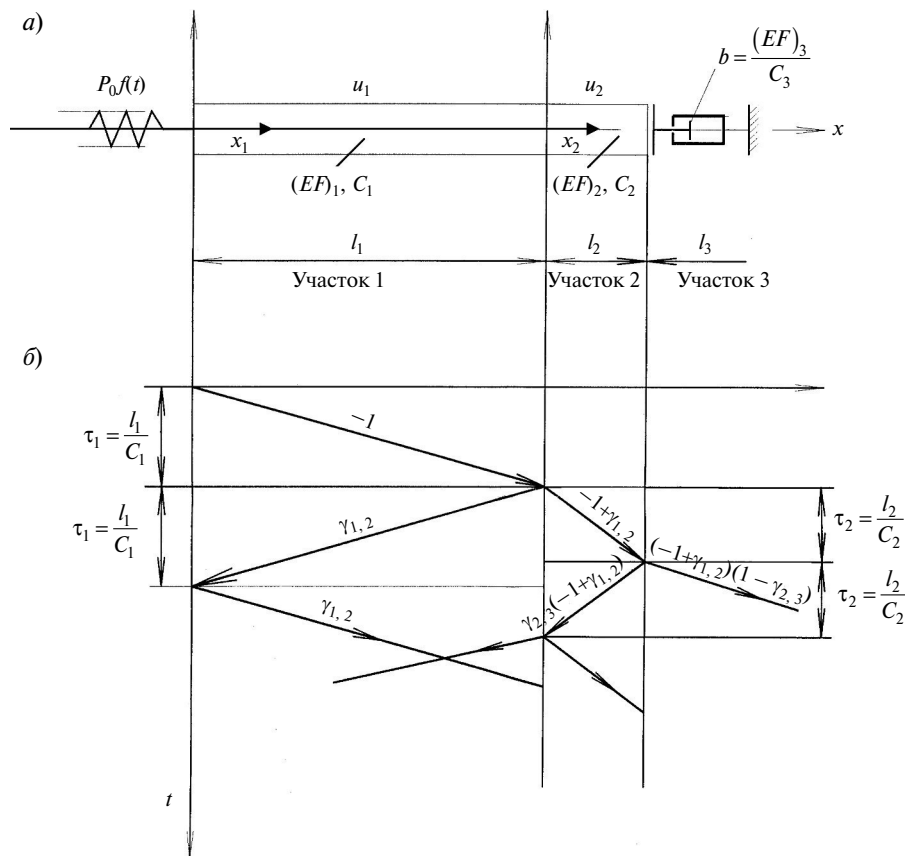


Рис 2. Распространение волн деформаций в составном полубесконечном стержне: а — расчетная схема; б — фрагмент распространения упругих волн

Уравнения (2), (4) составлены исходя из условия равновесия действующих сил в рассматриваемых сечениях, а (3) — из условия неразрывности деформаций в сопряженных сечениях. Уравнение (5), описывающее излучение энергии волн в стержне на бесконечность, получено на основе равновесия действующих сил и скоростей смещения сопряженных участков стержней с использованием взятой из работы [16] следующей зависимости:

$$u_3(x_3, t) = \alpha \left( t - \frac{x_3}{c_3} \right) \eta \left( t - \frac{x_3}{c_3} \right), \quad (6)$$

где  $u_3$  — величина смещения сечения стержня с координатой  $x_3$ ;  $\alpha \left( t - \frac{x_3}{c_3} \right)$  — некоторая задаваемая функция воздействия, зависящая только от координаты;  $\eta \left( t - \frac{x_3}{c_3} \right)$  — функция Хэвисайда.

Решение задачи осуществлено методом операционного исчисления.

Окончательно представим полученные выражения для вычисления смещений в сечениях первого и второго участков стержня, учитывающих отражение многочисленных волн деформаций от границ сопряженных участков, в виде суммы следующего ряда:

$$\begin{aligned} u_1(x_1, t) = & \varepsilon_0 c_1 \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=0}^n \sum_{k=0}^m \frac{n!(-1)^n}{(n-m)!(m-k)!k!} \times \\ & \times \gamma_{1,2}^{n-m+k} \gamma_{2,3}^m \left\{ \gamma_{2,3} f \left[ t + \frac{x_1}{c_1} + 2\tau_1(k-n-1) - 2\tau_2(1+m) \right] + \right. \\ & + \gamma_{1,2} f \left[ t + \frac{x_1}{c_1} + 2\tau_1(k-n-1) - 2\tau_2 m \right] - \\ & - \gamma_{1,2} \gamma_{2,3} f \left[ t - \frac{x_1}{c_1} + 2\tau_1(k-n) - 2\tau_2(1+m) \right] - \\ & \left. - f \left[ t - \frac{x_1}{c_1} + 2\tau_1(k-n) - 2\tau_2 \right] \right\}. \end{aligned} \quad (7)$$

Аналогично

$$\begin{aligned} u_2(x_2, t) = & \frac{2}{\alpha_{1,2} + 1} \varepsilon_0 c_1 \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=0}^n \sum_{k=0}^m \frac{n!(-1)^n}{(n-m)!(m-k)!k!} \times \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \times \gamma_{1,2}^{n-m-k} \gamma_{2,3}^m \times \\ & \times \left\{ \gamma_{2,3} f \left[ t + \frac{x_2}{c_2} + 2\tau_1(k-n-0,5) - 2\tau_2(1+m) \right] - \right. \\ & \left. - f \left[ t - \frac{x_2}{c_2} + 2\tau_1(k-n-0,5) - 2\tau_2 m \right] \right\}. \quad (8) \end{aligned}$$

Ввиду того, что в данном составном стержне с различной динамической жесткостью участков происходит отражение многочисленных волн деформаций от границ этих участков с их последующим наложением друг на друга, нахождение волны деформаций, сформировавшейся на различных участках стержня, представляет вычислительные трудности. Поэтому для представления полной картины деформаций стержней во времени с использованием формул (7) и (8) была составлена программа на ПК.

Решение по формулам (7) и (8) может быть представлено также графически (рис. 2) для случая однократного отражения прямой волны от границ сопряженных участков с различной динамической жесткостью. При этом расчеты по составленной программе на ПК для многократного отражения волн деформаций показали, что увеличение деформаций стержня как в пределах уплотняемого основания, так и за ее пределами не превышает 20–30 %.

Для проведения численных расчетов необходимо задать значения динамических характеристик аэрированного грунта, в частности модуля его упругости.

Установлено, что модуль упругости аэрированного водонасыщенного песка при относительном содержании воздуха  $\varepsilon = 0,01 - 0,05$  находится в пределах 55–65 МПа, а при незначительном содержании воздуха может быть принят (согласно исследованиям специалистов ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева) равным 2500–3000 МПа (с учетом жесткости частиц песка).

Таким образом, модуль объемной сжимаемости водонасыщенного песка после его аэрирования снижается в 40–60 раз.

Отсюда, используя формулы (7) и (8) или графическое решение (см. рис. 2) для однократного отражения первой прямой волны от границ сопряженных участков 1–2 и 2–3, находим

$$u_1(x_1, t) = (-1 + \gamma_{1,2}) u_0(x_1, t) \approx -1,8 u_0(x_1, t);$$



$$u_2(x_2 = \ell_2, t) = (-1 + \gamma_{1,2})(1 - \gamma_{2,3})u_0(x_1, t) \approx -0,4u_0(x_1, t),$$

где  $\alpha_{1,2} \approx \sqrt{\frac{E_2}{E_1}} \approx \frac{1}{7}$ ;  $\gamma_{1,2} = \frac{\alpha_{1,2} - 1}{\alpha_{1,2} + 1} = \frac{\frac{1}{7} - 1}{\frac{1}{7} + 1} \approx -0,8$ ;

$$\gamma_{2,3} = -\gamma_{1,2} = 0,8.$$

Полученные числовые значения позволяли ожидать при экспериментальных исследованиях увеличение амплитуд колебаний грунта в зоне уплотнения в 1,5–2 раза и их снижение за границей зоны аэрирования в 2,5–3 раза.

Теоретическое обоснование вибродинамической защиты близлежащих зданий и сооружений в натуральных условиях при использовании глубинных динамических методов уплотнения при аэрировании грунта по периметру уплотняемого основания производилось с учетом затухания волн деформаций как с расстоянием от места вибродинамического воздействия, так и в пределах аэрированного слоя грунтов основания.

Известно, что максимальное давление  $p_{\max}$  фронта ударной волны при незначительном содержании воздуха определяется по зависимости

$$p_{\max} = 60,0 \left( \frac{3\sqrt{C}}{R} \right)^{1,05}, \quad (9)$$

а при содержании воздуха 4–5 % — по формуле

$$p_{\max} = 4,5 \left( \frac{3\sqrt{C}}{R} \right)^{2,5}, \quad (10)$$

где  $p_{\max}$  — максимальное давление, МПа;  $C$  — масса заряда взрывчатого вещества, кг;  $R$  — расстояние от центра заряда, м.

Коэффициент отражения  $K_{\text{отр}}$  волн на границе сопряженных участков линейно-упругих сред с различным акустическим сопротивлением определяется по выражению

$$K_{\text{отр}} = \frac{2a_2}{a_1 + a_2}, \quad (11)$$

где  $a = \gamma c / g$  — акустическое сопротивление рассматриваемого участка основания ( $\gamma$  и  $c$  — соответственно удельный вес грунта основания и скорость распространения волн;  $g$  — ускорение свободного падения).

Или, принимая  $\gamma_1 = \gamma_3 \approx \gamma_2$ , преобразуем формулы для сопряженных участков: для участков 1–2

$$K_{\text{отр1}} = \frac{2c_2}{c_1 + c_2}; \quad (12)$$

для участков 2–3

$$K_{\text{отр2}} = \frac{2c_3}{c_2 + c_3}. \quad (13)$$

Используя зависимости (9)–(13), проведем расчеты снижения вибродинамического воздействия на примере взрыва стандартного заряда массой 5 кг, используемого при взрывном методе уплотнения оснований.

Расчетная схема характера затухания ударных волн деформаций при взрыве глубинных зарядов в обычном грунте и при наличии слоя аэрированного грунта представлена на рис. 3.

Известно, что скорость распространения волн при незначительном содержании воздуха в водонасыщенном песчаном грунте основания составляет 1600 м/с, а при содержании 4 % воздуха снижается до 200 м/с.

Согласно экспериментальным исследованиям, проведенным автором статьи, соотношение между шириной аэрированного слоя и глубиной погружения стержня аэратора составляет (1:3)–(1:7). Соответственно при заданной глубине уплотнения основания, равной 5–10 м, ширина аэрированного слоя будет составлять порядка 2–3 м.

В соответствии с проведенными лабораторными экспериментальными исследованиями для характерного испытания — при снижении амплитуд колебаний грунта за аэрированным слоем в 2,6 раза — ускорения колебаний грунтов основания снижаются в 1,65 раза.

В пересчете на снижение амплитуд колебаний в 10–24 раза для средней частоты 25 Гц колебаний грунта основания, зафиксированного в лабораторных опытах, это приводит к уменьшению ускорений колебаний за аэрированным слоем в 6–15 раз.

Таким образом, полученное снижение ускорений колебаний за аэрированным слоем пропорционально уменьшает максимальный расчетный уровень сейсмичности площадки строительства согласно СП 14.13330.2011 (Строительство в сейсмических районах. Актуализированная редакция СНиП II-7-81\*; введены

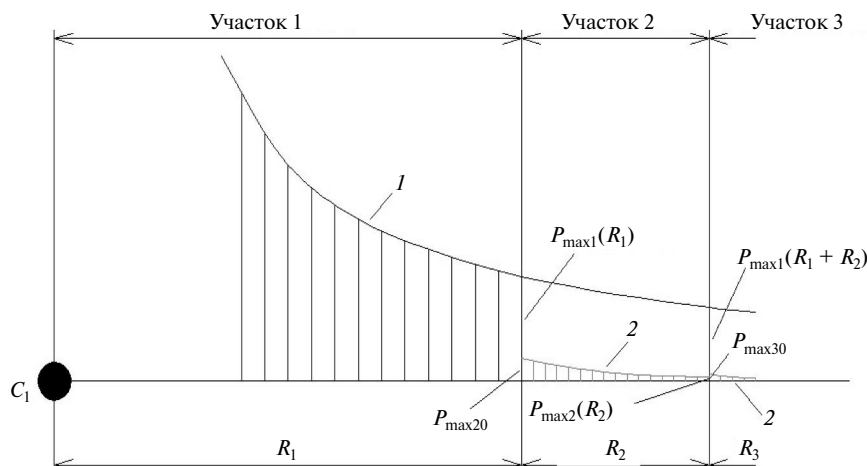


Рис. 2. Характер затухания максимальной ударной волны деформации от взрыва заряда в грунте обычном (1) и при наличии аэрированного виброзащитного слоя (2)

в действие 20.05.2011. — М.: Министерство Регионального развития Российской Федерации, 2011) не менее чем на 2–3 балла.

Проведенные ориентировочные расчеты показывают, что безопасное расстояние до близлежащих зданий и сооружений при наличии аэрированного виброзащитного слоя может снижаться на несколько сот метров.

#### Экспериментальные исследования

При подготовке к экспериментальным исследованиям были проведены предварительные лабораторные опыты, имеющие целью проверить степень и стабильность аэрации песчаной водонасыщенной грунтовой среды. Опыты проводились на установке, которая состояла из системы подачи воздуха (компрессор, аэратор, манометр, воздухопроводы) и оборудования для подготовки водонасыщенного грунта (стеклянный сосуд, воронка, весы). Система подачи воздуха была собрана по следующей схеме: компрессор — воздухопровод — манометр — воздухопровод — аэратор.

Опыты заключались в следующем. В мерный цилиндрический сосуд наливали водопроводную воду, в которую отсыпали песок (песок в воздушно-сухом состоянии). После отсыпки всего песка водонасыщенный грунт занимал объем емкости 430 мл, причем граница поверхности песка находилась на высоте  $h = 225$  мм от дна сосуда. При этом уровень воды устанавли-

вался на отметке 450 мл ( $h = 235$  мм), т. е. несколько выше поверхности песка.

Процесс аэрации грунта производился в такой последовательности. Стержень-аэратор при отключенном компрессоре погружался вертикально вдавливанием рукой в центр емкости до ее дна, а затем включали компрессор для подачи воздуха. Общее время подачи воздуха задавали равным 120 с.

За время подачи воздуха в водонасыщенном грунте появились видимые пузырьки и раковины воздуха, а в некоторых местах произошло расслоение песка образующимися трещинами. Такая картина в грунте сохранялась как при отключении компрессора, так и после извлечения стержня из сосуда. В процессе извлечения незначительное количество воздуха выходило из грунта. Отметим, что описанная картина в грунте сохранялась даже после довольно интенсивных ударов по крышке стола, на которой находился сосуд с аэрированным грунтом.

После окончания процесса аэрирования грунта уровень воды в емкости поднялся до отметки 470 мл ( $h = 245$  мм), а уровень поверхности песка понизился до 415 мл (217,5 мм). Последнее свидетельствует о том, что в результате погружения—извлечения стержня и нагнетания воздуха в грунт произошло некоторое уплотнение его скелета.

Согласно исследованиям профессора П.Л. Иванова при отсыпке песчаного грунта

в воду в нем содержится свободного воздуха менее 0,1 %. С учетом сказанного по изменившемуся объему воды в емкости может быть подсчитано содержание свободного газа в образце грунта.

Таким образом, предварительные опыты показали возможность введения воздуха в водонасыщенные песчаные грунты до объемного его содержания 4–5 %, что вполне достаточно для снижения модуля нормальной упругости такой среды примерно в 40–60 раз.

Давление подаваемого в грунт воздуха в рассматриваемом случае для довольно узкого сосуда превышало полное давление образца грунта в 4 раза. Следует предположить, что в неограниченном массиве грунта, где отсутствует сковывающее влияние стенок, необходимое давление будет меньше.

Основной целью экспериментальных лабораторных исследований было определение влияния создаваемой стенки из аэрированного грунта на параметры возбуждаемых колебаний при уплотнении водонасыщенного грунта основания.

Методика и результаты лабораторной проверки воздействия трамбовки на грунты основания при наличии зоны аэрирования грунта были следующими. Экспериментальные исследования проводились на лабораторном стенде, включавшем в себя металлический бак (внутренние размеры: длина — 84 см, ширина — 42 см, высота — 40 см), в который укладывался водонасыщенный грунт для испытаний. С целью исключения влияния отраженных волн бак был установлен на песчаную подушку, а его торцевые стенки обкладывались листами поролон на всю высоту бака.

Трамбующий груз представлял собой стальной диск диаметром 150 мм и толщиной 8 мм. Общая масса трамбующего груза составляла 1,1 кг.

Грунт — мелкий песок с содержанием гравия 0,1 % — отсыпался в воду, налитую в бак.

Для измерения колебаний грунта применялись датчики ускорения 9 марки ДУ-5, входящие в комплект виброизмерительной аппаратуры ВИ6–5М. Каждый датчик снабжался изготовленной из листового алюминия площадкой, заканчивающейся наконечником. Наконечники датчиков №№ 1, 2, 3, 4, 5 погружались на глу-

бину 15–20 мм в верхний слой грунта в различных точках по длине бака на расстояниях соответственно 150, 250, 350, 450 и 550 мм. Полученная чувствительность измерений была в диапазоне от 40 до 230 мм/г, что обеспечивало довольно четкую запись исследуемых процессов. Запись производилась на светочувствительную бумагу при скорости протяжки ленты осциллографа 250 мм/с.

Опыты проводились в следующей последовательности. По подготовленному для испытаний грунту основания наносились несколько ударов трамбующего груза с записью на осциллограф возникающих ускорений колебаний до полного их затухания от каждого удара. После того как картина распространения волн в грунте основания стабилизировалась, производилось аэрирование грунта в сечении между датчиками №3 и №4

Стержень погружался до дна бака в пяти точках основания по его ширине (в средней и двух промежуточных до каждой боковой стенки бака). При этом стержень выдерживался в каждой точке на дне бака и ориентировочно в середине толщины слоя песка в течение 15 с. Таким образом, общее время подачи воздуха с учетом того факта, что компрессор непрерывно работал в течение всего процесса аэрирования грунта, составляло примерно 180–210 с. После окончания процесса аэрирования производилось сбрасывание трамбующего груза на поверхность основания и запись возникающих в этом случае ускорений колебаний в основании.

Осциллографические записи ускорений колебания в характерном опыте для крайних датчиков по обеим сторонам от сечения, в котором и производилось аэрирование грунта, представлены на рис. 3.

Видно (см. рис. 3), что при аэрировании грунта максимальные ускорения колебаний увеличиваются в зоне уплотнения от 878,0 до 1158,2 мм/с<sup>2</sup>. При этом возникновение максимальных ускорений происходит при большем количестве циклов колебаний. Последнее свидетельствует о том, что возрастание ускорений колебаний в данном случае произошло за счет отражения волны от создаваемой стенки из аэрированного грунта. Произведенные расчеты по формуле  $A = W / (2\pi f)^2$  (где  $A$  — амплитуда колебаний грунта;  $W, f$  — ускорение и частота коле-

баний) показали, что амплитуда колебаний соответственно увеличилась от 37,4 до 59,6 мкм, иначе — в 1,6 раза.

Видно (см. рис. 3), что за пределами места аэрирования грунта, наоборот, произошло снижение ускорений колебаний от 926,6 до 700,3 мм/с<sup>2</sup>.

Амплитуда колебаний соответственно уменьшилась с 54,4 до 20,6 мкм, т. е. в 2,6 раза.

Проведенные опыты показывают, что ожидаемый эффект усиления колебаний в зоне уплотнения и их ослабления за аэрированной стенкой действительно существует. Учитывая, что опыты были проведены в стесненных условиях тонкостенного лотка ограниченных размеров, вследствие чего колебания из зоны уплотнения частично передавались за ее пределы не только через аэрированный слой, но и через боковые стенки и днище лотка, можно предположить, что вышеуказанный эффект в данном случае был снижен. В натуральных условиях он, несомненно, будет более значительным, что позволяет признать предложенный способ уплотнения несвязных водонасыщенных грунтов оснований перспективным.

Окончательная количественная его оценка может быть дана после выполнения необходимых опытных работ в натуральных условиях.

Опытное апробирование защиты близлежащих зданий от вибродинамического воздействия было впервые выполнено по предложению профессора О.А. Савинова для защиты жилого здания от интенсивной вибрации, вызываемой

колебаниями железнодорожных путей при прохождением вблизи него поездов в г. Ровно (Украина). Основой для этого предложения послужили разработки профессоров И.С. Шейнина и О.А. Савинова по защите верхнего бьефа гидротехнической плотины от сейсмического воздействия с помощью воздушной завесы. Вынужденные колебания жилого здания были настолько интенсивными, что нарушали санитарные нормы проживания в нем людей, которые писали многочисленные жалобы во всевозможные инстанции, вплоть до руководства страны. Для реализации данного предложения было осуществлено периодическое вибропогружение штанги с консолями в нижней части с верхними отверстиями для воздухонасыщения водонасыщенного грунта вдоль границы между рельсовым путем и жилым зданием. После этого вибрации здания фактически прекратились.

К сожалению, никакие специальные исследования, в том числе измерения параметров колебаний грунтов оснований и конструкций данного здания, в этом случае не велись.

Все же результаты статического зондирования, проведенные до и после осуществления процесса воздухонасыщения, показали очень значительное уплотнение грунта в промежутке между рельсовым путем и зоной воздухонасыщения. Можно свидетельствовать, что в результате многократного уплотнения за счет отражения волны деформаций от воздухоносной завесы грунт между ней и рельсовым путем уплотнился настолько, что фактически стал выполнять функцию отражателя волн деформации, вызванных колебаниями подвижного состава, от границы подверженного воздухонасыщению грунта. Данное заключение может подтверждать то обстоятельство, что после возможной ликвидации воздушной завесы в следствие многократного вибродинамического воздействия эффект виброизоляции здания сохраняется.

С высокой вероятностью можно предполагать, что данным методом могут быть успешно решаться задачи по сейсмической безопасности зданий и сооружений в различных регионах мира [18–25].

Для повышения эффективности вибродинамической защиты близлежащих зданий и сооружений от вибродинамического воздействия при

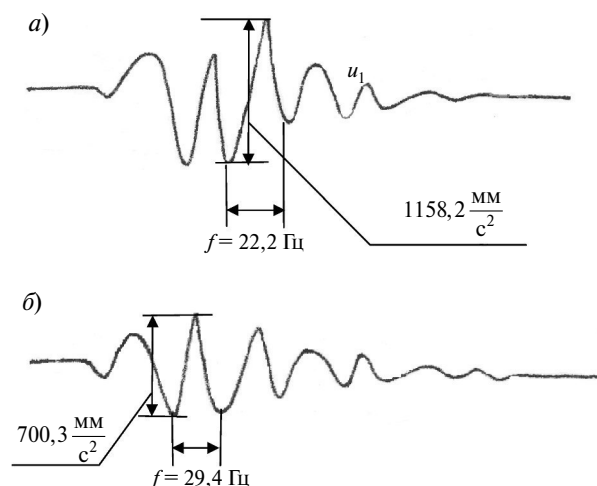


Рис. 3. Осциллограммы ускорений колебаний, зафиксированные датчиками № 1 (а) и № 5 (б) после аэрирования грунта



уплотнении водонасыщенных песчаных грунтов оснований динамическими методами — взрывами, тяжелыми трамбовками и виброуплотнителями различного типа — может использоваться метод аэрирования грунта на границах зон уплотнения основания.

При этом, как показали теоретические и лабораторные экспериментальные исследования, от создаваемых экранов из аэрированного грунта происходит отражение волн, что позволяет повысить амплитуды смещения грунта в пределах зоны уплотнения основания в 1,5–2 раза и понизить амплитуды колебаний грунта основания за пределами уплотняемого основания в 2–3 раза.

Теоретическими исследованиями взрыва сосредоточенного глубинного заряда в уплотняемом массиве с учетом параметров затухания волн деформаций установлено, что наличие аэрированного слоя грунта позволяет в 6–15 раз и более

снизить ускорение колебаний за пределами уплотняемого основания. При этом создание виброзащитного слоя из аэрированного грунта толщиной 2–3 м по границе уплотняемого основания позволяет не менее чем на 2–3 единицы снизить балльность основания для близлежащих зданий и сооружений

Опытное апробирование исследованного метода защиты близлежащих зданий и сооружений от вибродинамического воздействия для защиты жилого здания от интенсивной вибрации, вызываемой колебаниями железнодорожных путей при прохождении поездов близ этого здания, показало его высокую эффективность.

Изложенные в данной статье теория и практический метод создания экранирующих экранов, защищающих близлежащие здания и сооружения от воздействия вибрации, целесообразно применять при уплотнительной застройке городских территорий.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Florin V.A., Ivanov P.L. Liquefaction of Saturated Sandy Soils // Proceedings of the V International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Paris, 1961. Vol. 1. P. 182–186.
2. Ivanov P.L., Krasnikov N.D. Charge Expulsion Sounding of Saturated Cohesionless Soils // VI Symposium on Earthquake Engineering. University of Roorkee. 1978. Vol. 1. P. 151–156.
3. Ivanov P.L. Consolidation of Saturated Soils by Explosions // International Conference on Compaction. Paris, 1980. Vol. 1. P. 331–337.
4. Иванов П.Л. Уплотнение несвязных грунтов взрывами. М.: Недра, 1983. 230 с.
5. Dynamic Consolidation. The Menard Group: Centre Geotechnique de Paris. 1979. 19 p.
6. Chu J., Varaksin S., Klotz U., Menge P. State of Art Report: Construction Processes // 17 International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering: TC17 meeting ground improvements. Alexandria, Egypt. 2009, 7 October, 130.
7. Hamidi B., Varaksin S., Nikraz H. Predicting Soil Parameters by Modeling Dynamic Compaction Induced Subsidence // 6th Australasian Congress on Applied Mechanics (ACAM6). Perth (Australia), 2010. 12–15 December 2010, Paper 11–50.
8. Hamidi B., Varaksin S., Nikraz H. Implementation of Optimized Ground Improvement Techniques for Giga Project // GeoShanghai: Conference ASCE Geotechnical. Special Publication No 207: Ground Improvement and Geosynthetics. Shanghai, 2010. 3–5 June 2010. P. 87–92.
9. Hamidi B., Yee K., Varaksin S., Nikraz H., Wong L.T. Ground Improvement in Deep Waters Using Dynamic Replacement // 20th International Offshore and Polar Engineering Conference. Beijing, 2010. 20–26 June 2010. P. 848–853.
10. Hamidi B., Varaksin S., Nikraz H. Predicting Menard Modulus using Dynamic Compaction Induced Subsidence // International Conference on Advances in Geotechnical Engineering (ICAGE). Perth, 2011. 7–11 November 2011. P. 221–226.
11. Varaksin S., Hamidi B. Pressuremeter for Design and Acceptance of Challenging Ground Improvement Works // 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Works (18th ICSMGE). Parallel session: ISP6 — Pressio. 2013. Paris. 2–6 September 2013.
12. Минаев О.П. Эффективный метод уплотнения водонасыщенных грунтов взрывами // Основания, фундаменты и механика грунтов. 1993. №2. С. 17–19.
13. Минаев О.П., Савинов О.А. Перспективы применения тяжелых двухмассных трамбовок для уплотнения грунтов // Основания, фундаменты и механика грунтов. 1990. №4. С. 9–12.
14. Минаев О.П. Глубинное уплотнение песчаных грунтов виброустановкой модернизированной конструкции // Основания, фундаменты и механика грунтов. 2003. №6. С. 18–19.
15. Минаев О.П. Разработка динамических методов глубинного уплотнения слабосвязных грунтов оснований // Основания, фундаменты и механика грунтов. 2013. №6. С. 21–23.

16. **Minaev O.P.** Effective method of dynamic compaction slightly cohesive saturated soils // *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 2002. № 39 (6). P. 208–213.

17. **Uzdin A.M., Freze M.V.** Effectiveness of ground shields as seismic protection for building and structures // *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 2011. №48 (5). P. 190–195.

18. **Уздин А.М., Белаш Т.А., Блехман И.И.** О наследии профессора О.А. Савинова // *Основания, фундаменты и механика грунтов*. 2011. №5. С. 12–17.

19. **Idriss I.M., Boulanger R.W.** Soil liquefaction during earthquakes. USA, California: EERI, 2008. 240 p.

20. **Ishihara K.** Soil Behaviour in Earthquake Geotechnics. Monograph. USA, Oxford: Clarendon Press, Department of Civil Engineering Science University of Tokyo, 2006. 384 p.

21. **Ilichev V.A., Stavnitser L.R., Shiskin V.Ya.** Reduc-

tion of foundation vibration after bed strengthening with cast-in-place sand // *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 1995. №32(3). P. 92–94.

22. **Stavnitser L.R.** Prediction of accumulation of seismic deformation of bases // *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 1992. №29 (6). P. 187–191.

23. **Ishihara K.** New challenges in Geotechnique for ground hazards due to intensely strong earthquake shaking // *Geotechnical, Geological and Earthquake Engineering*. 2009. № 11. P. 91–114.

24. **Tsukamoto Y., Ishihara K.** Analysis on settlement of soil deposits following liquefaction during earthquakes // *Soils and Foundations*. 2010. № 50(3). P. 399–441.

25. **Ishihara K., Araki K., Toshiyuki K.** Liquefaction in Tokyo Bay and Kanto Regions in the 2011 Great East Japan Earthquake // *Geotechnical, Geological and Earthquake Engineering*. 2014. № 28. P. 93–140.

## REFERENCES

1. **Florin V.A., Ivanov P.L.** Liquefaction of Saturated Sandy Soils. *Proceedings of the V International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Paris, 1961. Vol. 1. P. 182–186.

2. **Ivanov P.L., Krasnikov N.D.** Charge Expulsion Sounding of Saturated Cohesionless Soils. *VI Symposium on Earthquake Engineering*: University of Roorkee, 1978, Vol. 1. P. 151–156.

3. **Ivanov P.L.** Consolidation of Saturated Soils by Explosions. *International Conference on Compaction*. Paris, 1980. Vol. 1. P. 331–337.

4. **Ivanov P.L.** Uplotneniye nesvyaznykh gruntov vzryvami. M.: Nedra, 1983. 230 s. (rus.)

5. Dynamic Consolidation. The Menard Group: Centre Geotechnique de Paris. 1979. 19 p.

6. **Chu J., Varaksin S., Klotz U., Menge P.** State of Art Report: Construction Processes. *17 International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering: TC17 meeting ground improvements*, Alexandria, Egypt. 2009, 7 October. 130.

7. **Hamidi B., Varaksin S., Nikraz H.** Predicting Soil Parameters by Modeling Dynamic Compaction Induced Subsidence. *6th Australasian Congress on Applied Mechanics (ACAM6)*, Perth, Australia, 2010. 12–15 December 2010. Paper 11–50.

8. **Hamidi B., Varaksin S., Nikraz H.** Implementation of Optimized Ground Improvement Techniques for Giga Project. *GeoShanghai. Conference ASCE Geotechnical Special Publication No 207: Ground Improvement and Geosynthetics*. Shanghai. 2010. 3–5 June 2010. P. 87–92.

9. **Hamidi B., Yee K., Varaksin S., Nikraz H., Wong L.T.** Ground Improvement in Deep Waters Using Dynamic Replacement. *20th International Offshore and Polar Engineering Conference*. Beijing. 2010. 20–26 June 2010. P. 848–853.

10. **Hamidi B., Varaksin S., Nikraz H.** Predicting Menard Modulus using Dynamic Compaction Induced Subsidence. *International Conference on Advances in Geotechnical Engineering (ICAGE)*. Perth, 2011, 7–11 November. 2011. P. 221–226.

11. **Varaksin S., Hamidi B.** Pressuremeter for Design and Acceptance of Challenging Ground Improvement Works. *18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Works (18th ICSMGE)*, Parallel session: ISP6 — Pressio 2013. Paris. 2–6 September 2013.

12. **Minayev O.P.** Effektivnyy metod uplotneniya vodonasychennykh gruntov vzryvami. *Osnovaniya, fundamenty i mekhanika gruntov*. 1993. №2. S. 17–19. (rus.)

13. **Minayev O.P.** Perspektivy primeneniya tyazhelykh dvukhmassnykh trambovok dlya uplotneniya gruntov/ O.P. Minayev, O.A. Savinov. *Osnovaniya, fundamenty i mekhanika gruntov*. 1990. №4. S. 9–12. (rus.)

14. **Minayev, O.P.** Glubinnoye uplotneniye peschanykh gruntov vibroustanovkoy modernizovannoy konstruksii. *Osnovaniya, fundamenty i mekhanika gruntov*. 2003. №6. S. 18–19. (rus.)

15. **Minayev O.P.** Razrabotka dinamicheskikh metodov glubinnogo uplotneniya slabosvyaznykh gruntov osnovaniy. *Osnovaniya, fundamenty i mekhanika gruntov*. 2013. №6. S.21–23. (rus.)

16. **Minaev O.P.** Effective method of dynamic compaction slightly cohesive saturated soils. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 2002. № 39 (6). P. 208–213.

17. **Uzdin A.M., Freze M.V.** Effectiveness of ground shields as seismic protection for building and structures. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 2011. №48 (5). P. 190–195.

18. **Уздин А.М.** О наследии профессора О.А. Савинова/ А.М. Уздин, Т.А. Белаш, И.И. Блехман. *Osnovaniya, fundamenty i mekhanika gruntov*. 2011. №5. S. 12–17. (rus.)

19. **Idriss I.M., Boulanger R.W.** Soil liquefaction during earthquakes. USA, California: EERI, 2008. 240 p.

20. **Ishihara K.** Soil Behaviour in Earthquake Geotechnics: Monograph. USA, Oxford, Clarendon Press: Department of Civil Engineering Science University of Tokyo, 2006, 384 с.

21. **Иичев В.А., Stavnitser L.R., Shiskin V.Ya.** Reduction of foundation vibration after bed strengthening with cast-in-place sand. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 1995, №32(3). P. 92–94.

22. **Stavnitser L.R.** Prediction of accumulation of seismic deformation of bases. *Soil Mechanics and Founda-*

*tion Engineering*. 1992. №29 (6). P. 187–191.

23. **Ishihara K.** New challenges in Geotechnique for ground hazards due to intensely strong earthquake shaking. *Geotechnical, Geological and Earthquake Engineering*. 2009, № 11. P. 91–114.

24. **Tsukamoto Y., Ishihara K.** Analysis on settlement of soil deposits following liquefaction during earthquakes. *Soils and Foundations*. 2010. № 50(3). P. 399–441.

25. **Ishihara K., Araki K., Toshiyuki K.** Liquefaction in Tokyo Bay and Kanto Regions in the 2011 Great East Japan Earthquake. *Geotechnical, Geological and Earthquake Engineering*. 2014. № 28. P. 93–140.

### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

**МИНАЕВ Олег Петрович** — кандидат технических наук докторант Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. 195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29. E-mail: minaev.op@bk.ru

### AUTHOR

**MINAEV Oleg P.** — St. Petersburg State Polytechnical University. 29, Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia. E-mail: minaev.op@bk.ru