

DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-6-1175-1185

## IMPROVEMENT OF OPERATIONAL SAFETY AND RELIABILITY OF PORT HYDROTECHNICAL STRUCTURES TO THE LIQUEFACTION OF SOIL BASES BY A NEW EXPLOSIVE SEALING METHOD

**O. P. Minaev**

Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping,  
St. Petersburg, Russian Federation

*Increase of operational safety and reliability is the most important task in the construction of port hydraulic structures. Sandy grounds are widely used to form new and expand existing areas of port hydraulic structures, including sandy backfill of city and port embankments. Liquefaction of water-saturated sandy grounds of bases is the most dangerous phenomenon for structures and buildings under technogenic dynamic impacts and earthquakes. In this connection abroad particularly in the United States and Japan is underway extensive research on the subject. The most effective way to improve the technogenic dynamic impacts and seismic safety of liquefaction soil bases and facilities is their seal. For this there are various methods of dynamic seal. However currently the use of these methods in the global construction practice is based on the developments of Russian specialists 50 ... 60-ies years of last century. Increasing the operational safety and reliability of port hydraulic structures to the liquefaction of sandy soils can be ensured by their compaction. The author of the report shows the high efficiency of the explosive method for sealing water-saturated sandy soils bases designed them a new way of consecutive blasting charges. In addition, a method consecutive blasting charges and proposed them a new method vibration isolation soil bases of construction site allows several times to reduce the magnitude of the dynamic effects on nearby buildings and weak indigenous soils.*

*The carried out researches have shown that the method of consecutive blasting of charges allows to increase the relative sediments of the compaction base by 30 – 40 % and to reach the degree of soil base density  $I_D$ , not less than 0,6 – 0,8, which practically ensures the stability of sandy ground structure to their liquefaction in the base of buildings and structures from technogenic vibrodynamic and seismic influences. In addition, the use of the method of sequential charge blasting to compact the base soils allows a reduction of 2, 5 – 3 times the safety distances for buildings and structures. Moreover, the additional creation of a special protection in the form of a layer of aerated soil along the boundary of the base to be compacted makes it possible to almost completely eliminate the danger of technogenic vibrodynamic effects arising from the dynamic compaction of the grounds of new construction bases to nearby buildings and structures. This allows us to expand the scope of the dynamic methods of compaction of sandy water-saturated soils for the conditions of expansion of existing port hydrotechnical complexes and the presence of weak clay soils with structural strength at their base.*

*Keywords: safety, reliability, hydraulic structures, foundations and structures, sealing method, explosive method, vibration isolation method of construction.*

### **For citation:**

Minaev, Oleg P. "Improvement of operational safety and reliability of port hydrotechnical structures to the liquefaction of soil bases by a new explosive sealing method." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admiral S. O. Makarova* 9.6 (2017): 1175–1185. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-6-1175-1185.

**УДК 624.2:624.131.3:627.25**

## ПОВЫШЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ И НАДЕЖНОСТИ ПОРТОВЫХ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ ПРИ РАЗЖИЖЕНИИ ГРУНТОВ ОСНОВАНИЙ НОВЫМ ВЗРЫВНЫМ СПОСОБОМ УПЛОТНЕНИЯ

**О. П. Минаев**

ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»,  
Санкт-Петербург, Российская Федерация

*Повышение эксплуатационной безопасности и надёжности является наиважнейшей задачей при строительстве портовых гидротехнических сооружений. Для образования новых и расширения су-*

существующих территорий портовых гидротехнических сооружений, в том числе песчаных насыпок городских и портовых набережных широко применяются песчаные грунты. Повышение эксплуатационной безопасности и надежности портовых гидротехнических сооружений процессу разжижения песчаных грунтов может быть обеспечено их уплотнением. Показана высокая эффективность взрывного метода для уплотнения водонасыщенных песчаных грунтов оснований разработанным автором новым способом последовательного взрывания зарядов. К тому же способ последовательного взрывания зарядов и предложенный новый способ виброизоляции площадки строительства позволяют в несколько раз снизить величину динамических воздействий на близлежащие здания и сооружения, а также слабые коренные грунты в основании портовых сооружений.

Проведенные исследования показали, что способ последовательного взрывания зарядов позволяет на 30 – 40 % увеличить относительные осадки уплотняемого основания и достигнуть степени плотности грунтов основания  $I_D$  не менее 0,6 – 0,8, что практически обеспечивает устойчивость структуры песчаных грунтов их разжижению в основании зданий и сооружений, обусловленных вибродинамическими и сейсмическими воздействиями. Кроме того, применение способа последовательного взрывания зарядов для уплотнения грунтов оснований позволяет в 2,5 – 3 раза сократить безопасные расстояния для зданий и сооружений. При этом дополнительное создание специальной защиты в виде слоя из аэрированного грунта вдоль границы уплотняемого основания позволяет практически полностью ликвидировать опасность техногенных вибродинамических воздействий, возникающих при динамическом уплотнении грунтов оснований нового строительства, на близлежащие здания и сооружения. Это дает возможность расширить область применения динамических методов уплотнения песчаных водонасыщенных грунтов в условиях расширения существующих портовых гидротехнических комплексов и наличия в их основании слабых глинистых грунтов, обладающих структурной прочностью.

*Ключевые слова:* безопасность, надежность, гидротехнические сооружения, основания и сооружения, способ уплотнения, взрывной метод, способ виброизоляции площадки строительства.

**Для цитирования:**

Минаев О. П. Повышение эксплуатационной безопасности и надежности портовых гидротехнических сооружений при разжижении грунтов оснований новым взрывным способом уплотнения / О. П. Минаев // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 6. — С. 1175–1185. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-6-1175-1185.

## Введение

Повышение эксплуатационной безопасности и надёжности является важнейшей задачей при строительстве портовых гидротехнических сооружений [1] – [3]. Для образования новых и расширения существующих территорий портовых гидротехнических сооружений, в том числе насыпок городских и портовых набережных, как правило, применяются песчаные грунты. Разжижение водонасыщенных песчаных грунтов оснований является наиболее опасным явлением для сооружений и зданий при техногенных динамических воздействиях и землетрясениях. Первые детальные исследования процесса разжижения песчаных грунтов, их консолидации и динамического уплотнения взрывным методом были проведены в середине XX в. проф. П. Л. Ивановым применительно к строительству крупных плотин на песчаных основаниях [4], [5]. Данные исследования базировались на теории консолидации грунтов, созданной проф. В. А. Флориным [4].

В истории известно множество катастрофических аварий и разрушений зданий и сооружений, вызванных землетрясениями. Среди последних следует отметить землетрясение в г. Нефтегорске (о. Сахалин, Россия), когда первые два этажа жилых пятиэтажных зданий буквально «утонули» в разжиженном слое песка. В результате землетрясения г. Нефтегорск был полностью разрушен и не подлежит восстановлению.

География катастрофических и разрушительных землетрясений в мире в последние годы остаётся довольно широкой. Среди них следует выделить крупнейшее землетрясение магнитудой 9,0 баллов, которое произошло на АЭС в г. Фукусимо (Япония, 2011 г.), а также последние, произошедшие в 2010 – 2016 гг. в США, Греции, Италии, Чили, Китае, Японии и Тайване. Следует отметить, что на Японию приходится около 20 % всех землетрясений в мире магнитудой 6,0 баллов и выше. В связи с этим за рубежом, в особенности в США и Японии, ведутся масштабные исследования явления разжижения грунтов оснований и сооружений, рассмотренные в работах [6] – [11]

и других публикациях. Проведение данных исследований началось в США позднее, чем в России, проф. Н. В. Seed и было продолжено его учениками — проф. I. M. Idriss и проф. R. W. Boulanger [6] – [9].

Особой вехой в этом направлении явились исследования проф. Kenji Ishihara (Япония), которые были обобщены им в монографии «Поведение грунтов при землетрясениях» (К. Ишихара, СПб., 2006, пер. на рус. яз.) [11].

Наиболее действенным способом повышения техногенной и сейсмической безопасности и надёжности разжижению грунтов оснований и сооружений является их уплотнение [12] – [14]. Для этого имеются различные динамические методы уплотнения, однако в настоящее время их применение в зарубежной строительной практике основано на разработках российских специалистов 50- – 60-х гг. XX в.

*Целью настоящей статьи* является ознакомление учёных и специалистов, строителей и проектировщиков портовых гидротехнических сооружений с современными исследованиями и разработками, направленными на повышение безопасности и надёжности данных сооружений процессу разжижения грунта при статических и в особенности динамических (техногенных и сейсмических) воздействиях для предотвращения неравномерных осадок и просадок грунта, образования каверн и полостей в песчаной засыпке и в основании портовых сооружений. Тем самым могут быть предотвращены недопустимые деформации и разрушение зданий и сооружений портового комплекса, обеспечивается надёжная работа грузоподъёмных кранов, повышается устойчивость оградительных и причальных сооружений набережных портов и т. д.

Данная цель, состоящая в недопущении катастрофического процесса разжижения грунта при эксплуатации портовых гидротехнических сооружений от динамических (волновых, фильтрационных, взрывных, сейсмических и др.) воздействий, может быть достигнута за счёт уплотнения песчаных грунтов засыпок и оснований портовых сооружений новым эффективным взрывным способом уплотнения, разработанным автором статьи [15]. Кроме того, в статье представлены исследования автора по виброизоляции площадки строительства, осуществляемой с помощью нового высокоэффективного способа защиты, практически полностью предотвращающего влияние вредных динамических воздействий, возникающих в процессе уплотнения грунтов, на существующие близлежащие здания и сооружения [16]. Также приведены результаты теоретических и экспериментальных (лабораторных и натурных) исследований практического внедрения. Данные исследования имеют научную и практическую значимость как в части развития существующих расчётных моделей, так и в части проведения уникальных лабораторных и крупномасштабных натурных экспериментальных исследований, а также получения данных практического применения в гидротехническом строительстве.

Основные результаты исследований, изложенных в данной статье, были освещены автором на пленарном докладе XII Российской национальной конференции по сейсмическому строительству и сейсмическому районированию (с международным участием), состоявшейся 12 – 16 сентября 2017 г. в г. Ялте Республики Крым, а также частично были представлены на XIX Международном конгрессе по механике грунтов и инженерной геологии в г. Сеуле, Южная Корея (17 – 22 сентября 2017 г.).

### **Методы и материалы исследований**

В процессе теоретических исследований была рассмотрена задача о взрыве зарядов, размещённых в одном ярусе по глубине и на определенном расстоянии в плане в пределах уплотняемого участка основания с заданным интервалом времени, в том числе в стадии частичной консолидации грунта основания от взрыва предыдущего заряда.

Для характеристики напряженного состояния «скелета» грунта основания и действия ударной волны с учётом дополнительного воздействия фильтрационных сил было предложено соотношение

$$\Delta = \frac{\sigma(p_{\max}) + \sigma(\Phi)}{\sigma(\gamma_{гр})}, \quad (1)$$

где  $\sigma(p_{\max})$  — максимальные давления ударной волны воздействия взрыва, передающиеся на скелет грунта основания;  $\sigma(\Phi)$  — фильтрационные напряжения в грунтах основания в стадии частичного разжижения грунта от взрыва предыдущего заряда.

В случае отсутствия заземленного газа в грунте основания по В. А. Флорину

$$\sigma(p_{\max}) = \frac{(\beta_{т}m + \beta_{в}n)p_{\max}}{(\beta_{т}m + \beta_{в}n + \beta_{ск})}, \quad (2)$$

где  $m = 1-n$ ;  $\beta_{т}$ ,  $\beta_{в}$ ,  $\beta_{ск}$  — соответственно коэффициенты объемной сжимаемости твердых минеральных частиц, воды и скелета грунта основания.

Для водонасыщенных песков с незначительным содержанием в них заземленного газа по данным Г. М. Ляхова зависимость для максимального давления ударной волны в грунтах основания имеет вид

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

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

Вертикальные напряжения в скелете грунта основания на глубине с учетом взвешивающего действия воды определяются в виде

$$\sigma(\gamma_{гр}) = (\gamma_s - \gamma_w)(1-n)z, \quad (4)$$

где  $\gamma_s, \gamma_w$  — удельный вес частиц грунта и воды;  $n$  — пористость грунта;  $z$  — глубина, м.

По результатам опытных взрывов глубинных зарядов в водонасыщенных мелких песках основания значение  $\Delta$  (см. формулу (1)) может быть принято при рыхлом их сложении равным 5 – 15 и при средней плотности сложения — 15 – 30.

По зависимости В. А. Флорина время уплотнения  $t_{уп}$  слоя грунта основания может быть определено по формуле

$$t_{уп} = \frac{\gamma_w h_{уп} n_1 - n_2}{\gamma_{вз} K_{ф} (1 - n_1)}, \quad (5)$$

где  $\gamma_w$  — удельный вес воды;  $\gamma_{вз}$  — удельный вес взвешенного в воде грунта;  $h_{уп}$  — мощность уплотняемого слоя грунта основания;  $K_{ф}$  — коэффициент фильтрации уплотняемого грунта;  $n_1, n_2$  — соответственно начальная пористость грунта и пористость грунта после этапа уплотнения.

Для ориентировочной оценки безопасного расстояния, на котором колебания грунта, вызываемого однократным взрывом сосредоточенного заряда взрывчатых веществ (ВВ) заданной массы, становятся безопасными для обычных зданий и сооружений на водонасыщенных грунтах, использовалась известная зависимость [17].

В более строгих расчётах применялись формулы для определения максимального давления  $p_{\max}$  фронта ударной волны при незначительном содержании воздуха, а при наличии специальной защитного слоя грунта вдоль границы уплотняемого основания — для максимального давления  $p_{\max}$  фронта ударной волны при содержании воздуха 4 – 5 % с учётом коэффициента отражения  $K_{отр}$  волн на границе сопряженных участков линейно-упругих сред с различным динамическим сопротивлением. Расчетная схема характера затухания ударных волн деформаций при взрыве глубинных зарядов в обычном грунте и при наличии слоя аэрированного грунта представлена на рис. 1.

В соответствии с источником библиографии [5] максимальное давление  $p_{\max}$  фронта ударной волны при содержании воздуха 4 – 5 % определяется по зависимости

$$p_{\max} = 4,5 \left( \frac{3\sqrt{C}}{R} \right)^{2,5}, \quad (6)$$

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

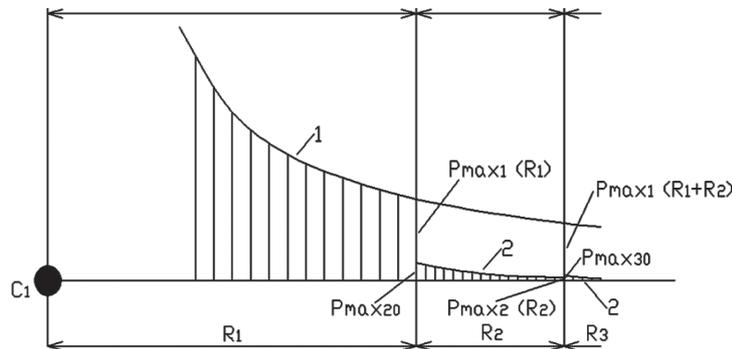


Рис. 1. Характер затухания максимальной ударной волны деформации от взрыва заряда в грунте обычном 1 и при наличии аэрированного виброзащитного слоя 2

Согласно [18], коэффициент отражения  $K_{\text{отр}}$  волн на границе сопряженных участков линейно-упругих сред с различным динамическим сопротивлением определяется по выражению

$$K_{\text{отр}} = \frac{2a_2}{a_1 + a_2}, \quad (7)$$

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

Для проведения контрольных натурных исследований были выбраны два рядом расположенных участка основания на строительстве Комплекса защитных сооружений г. Санкт-Петербурга от наводнений. На первой площадке основания производилось одновременное взрывание всех зарядов в каждой из четырех очередей, а на второй — последовательное. Таким образом, на первой площадке одновременно было взорвано шестнадцать зарядов, на второй площадке основания каждый заряд в очереди взрывался отдельно в местах погружения зарядов (рис. 2). Разрыв между взрывами отдельных зарядов составлял 3 – 5 мин (в отдельных случаях — до 10 мин).

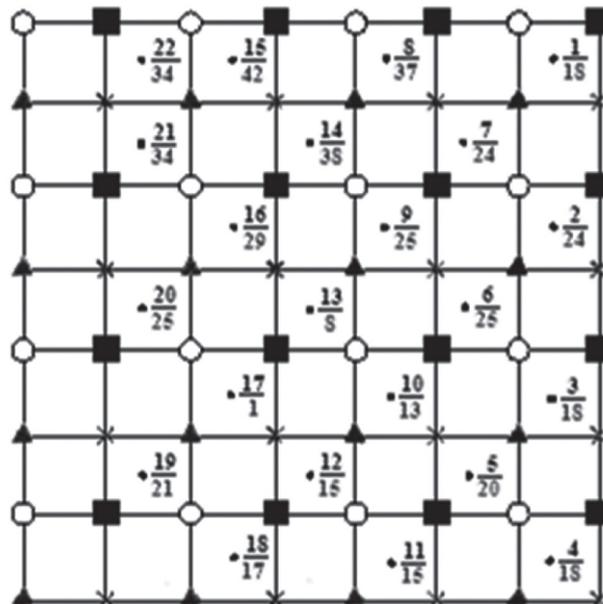


Рис. 2. План опытного участка уплотнения грунта основания последовательным взрыванием зарядов  
 Условные обозначения:

- — заряды 1-й очереди; □ — заряды 2-й очереди; × — заряды 3-й очереди;
- ▲ — заряды 4-й очереди; в числителе дроби — порядковые номера поверхностных марок; в знаменателе — суммарная осадка грунта поверхности основания после четырех очередей взрывов в см

Основной целью экспериментальных лабораторных исследований являлось выявление возможности создаваемой стенки из азрированного грунта отражать упругие волны деформаций и количественно определить её влияние на параметры возбуждаемых колебаний при динамическом воздействии на водонасыщенные грунты основания. Экспериментальные исследования проводились на лабораторном стенде, на котором был установлен бак, куда укладывался водонасыщенный грунт для исследований. Динамическое воздействие осуществлялось сбрасываемым грузом по направляющей на поверхность уложенного в баке грунта. Для измерения колебаний грунта применялись датчики ускорения, установленные по длине бака.

### Результаты исследований

Результаты расчётов показали, что при последовательном взрыве двух зарядов с интервалом  $\Delta t \geq t_{\text{уп1}}$ , где  $t_{\text{уп1}}$  — время уплотнения разжиженного слоя  $h_{\text{уп1}}$  грунта основания от взрыва первого заряда в нижней части, в промежутках между зарядами существует значительная «мертвая зона», не подверженная полному разжижению грунта.

В процессе консолидации грунта граница  $r_1$  разжиженного слоя грунта перемещается к поверхности, и процесс полностью заканчивается при  $r_1 = h_{\text{уп1}}$ . При этом последующий взрыв рядом расположенного заряда с интервалом времени  $\Delta t < t_{\text{уп1}}$  позволяет не только обеспечить разжижение грунта в этой неразжиженной зоне, но и повторно воздействовать на грунты основания, подверженные воздействию предыдущего заряда (рис. 3). Данное обстоятельство приводит к многократному разжижению грунта в промежутках между зарядами, повторяющимися при последующих очередях взрывов. При этом ослабление структуры массива грунта основания за счет развития фильтрационных сил в процессе консолидации от взрыва предыдущего заряда способствует запасу эффективности воздействия взрыва последующего заряда.

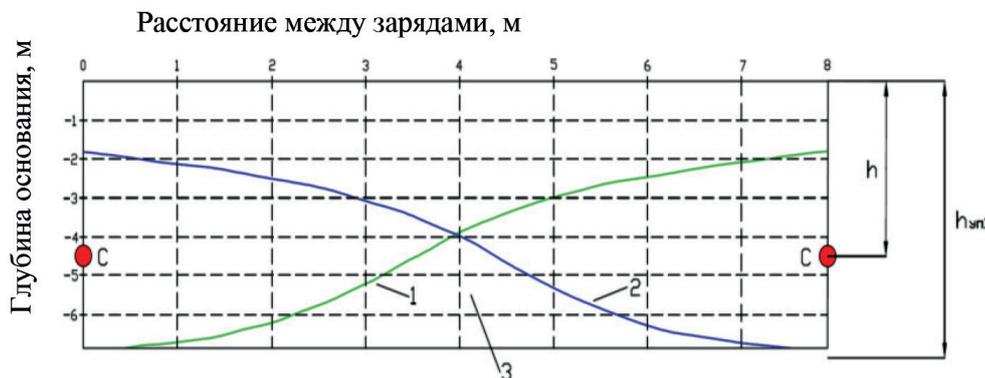


Рис. 3. Графики зависимости глубины разжижения грунта от центра взрыва зарядов при последовательном взрыве двух рядом расположенных зарядов с интервалом времени  $\Delta t \geq t_{\text{уп}}$ :  
1, 2 — зоны разжижения грунта от взрыва первого и второго заряда соответственно;  
3 — «мертвая зона», не подверженная разжижению грунта основания

Аналогичные расчеты для одновременного взрыва двух рядом расположенных зарядов (рис. 4) свидетельствуют о том, что в данном случае может быть практически ликвидирована «мертвая зона» грунтов основания ненарушенной структуры между соседними зарядами за счет усиления встречных ударных волн деформаций при их наложении. Однако при этом не может быть получен эффект повторного разрушения структуры грунта основания от взрыва последующего заряда. По данным [5], [18], скорость распространения волн при незначительном содержании воздуха в водонасыщенном песчаном грунте основания составляет 1600 м/с, а при содержании воздуха 4 % снижается до 200 м/с. Принимая  $\gamma_1 = \gamma_3 \approx \gamma_2$  в выражении (7), вычислим для сопряженных участков 1 – 2 и 2 – 3, соответственно,  $K_{\text{отр1}} = 0,22$  и  $K_{\text{отр2}} = 1,78$ . Отсюда полученные числовые значения позволили ожидать при экспериментальных исследованиях снижение амплитуд колебаний грунта за границей зоны азрирования в 2,5 – 3 раза.

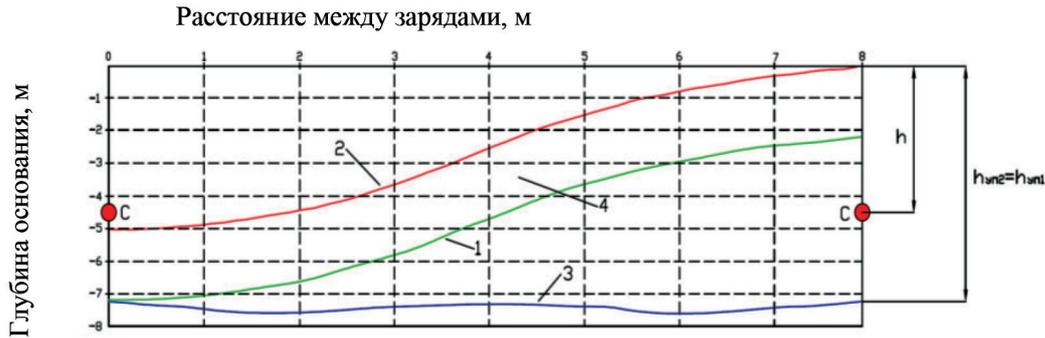


Рис. 4. Графики зависимости глубины разжижения грунта от расстояния от центра взрыва зарядов при последовательном взрыве двух рядом расположенных зарядов с интервалом времени  $\Delta t \leq t_{\text{уп}}$

- 1 — зона разжижения грунта от взрыва первого заряда;
- 2 — зона разжижения грунта в процессе консолидации грунта за время  $\Delta t$  после взрыва первого заряда;
- 3 — зона разжижения грунта от взрыва второго заряда с интервалом  $\Delta t = 0,3t_{\text{уп}}$ ;
- 4 — зона повторного разжижения грунта основания

Для стандартного заряда массой 5 кг и радиуса эффективного действия заряда 5 м по формуле (3) было найдено, что давление в падающей ударной волне  $p_{\text{max1}}$  ( $R_1 = 5$  м) на внутренней границе аэрированного слоя равно 19,45 МПа. При этом с учетом коэффициента отражения волн  $K_{\text{отр1}}$  на границе с более сжимаемой средой давление в проходящей ударной волне  $p_{\text{max20}}$  на границе участков 1 – 2 составило 4,28 МПа.

Далее по зависимости (6) было найдено максимальное давление фронта в проходящей ударной волне на внешней границе аэрированного слоя  $p_{\text{max30}}$ , т. е. на границе сопряженных участков 2 – 3. С учетом коэффициента отражения  $K_{\text{отр2}}$  от границы сопряженных участков 2 – 3 данные значения были равными 1346 кН/м<sup>2</sup> и 488 кН/м<sup>2</sup> для аэрированного слоя грунта толщиной 2 и 3 м соответственно. Аналогично для обычного грунта максимальное давление фронта ударной волны, вычисленное по формуле (3) для расстояний  $R_1 + R_2$  от взрыва ВВ, равных 7 и 8 м, составило, соответственно, 13,7 и 11,9 МПа. Отсюда было определено, что максимальное давление фронта ударной волны на грунты основания снижается при наличии стенки из аэрированного грунта по периметру уплотняемого основания в 10 – 24 раза.

Геодезические измерения осадок поверхности основания показали, что величина относительной осадки на площадке последовательного взрывания после четырех очередей составила 0,052, одновременного — 0,039 для средних осадок на уплотняемом основании и 0,091 и 0,065 для максимальных осадок. Весьма убедительными явились результаты статического зондирования основания. На первой площадке сопротивление внедрению острия зонда изменилось лишь на 4 – 6 МПа, а на площадке последовательного взрывания оно увеличилось с 2 МПа до 10 – 16 МПа, что свидетельствует о значительном уплотнении грунта основания (рис. 5).

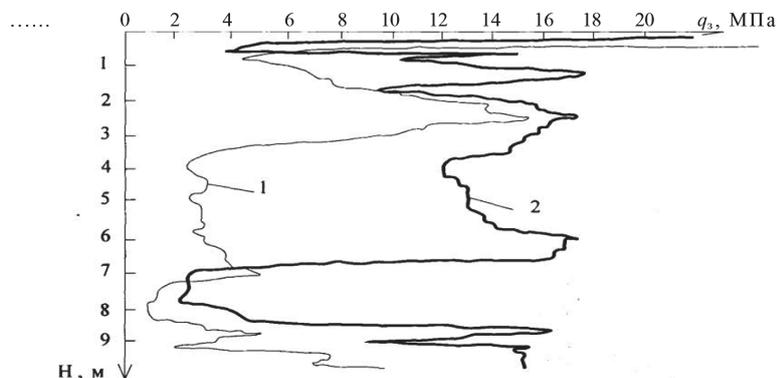


Рис. 5. Графики зависимости сопротивления  $q_3$  внедрению острия зонда от глубины  $H$  его погружения в грунты основания по результатам статического зондирования песчаного грунта при последовательном взрывании зарядов: 1 — до взрыва; 2 — после взрыва всех зарядов

В проведенных лабораторных экспериментах было получено снижение амплитуд смещений поверхностного слоя водонасыщенного грунта, находящегося за пределами сечения, в котором осуществлялось аэрирование грунта, в 2 – 3 раза, что полностью согласуется с расчётными данными отражения волн деформаций без учёта их поглощения в аэрированном грунте защитного слоя грунтов основания на границе уплотнения (рис. 6). В пересчете на снижение амплитуд колебаний, полученных при учёте затухания волн деформаций в аэрированном слое грунта для средней частоты колебаний грунта основания, равной 25 Гц, зафиксированной в лабораторных опытах, что будет составлять уменьшение ускорений колебаний за аэрированным слоем в 6 – 15 раз. Это практически полностью исключает вредные техногенные вибродинамические воздействия на близлежащие здания и сооружения [19], [20].

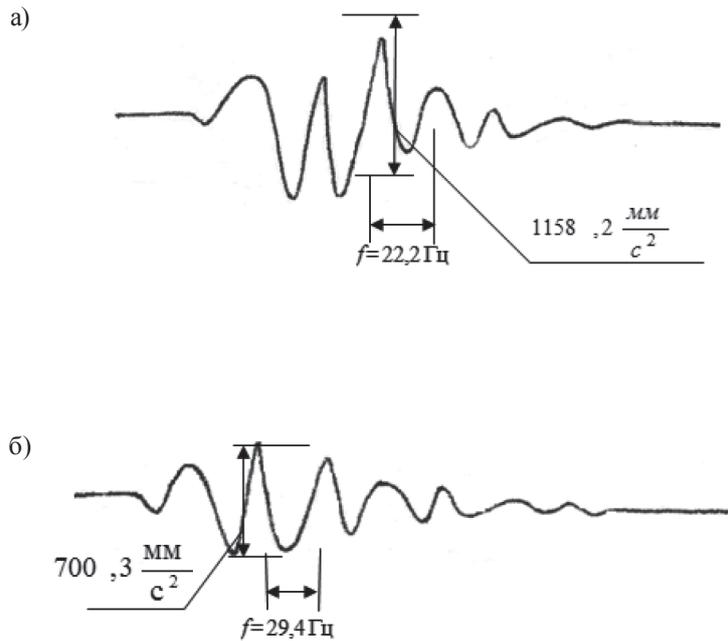


Рис. 6. Осциллограммы ускорений колебаний, зафиксированные датчиками ускорений колебаний до (а) и после (б) аэрированного слоя грунта

Опытное апробирование защиты близлежащих зданий от вибродинамического воздействия было впервые выполнено по предложению проф. О. А. Савинова для защиты жилого здания от интенсивной вибрации, вызываемой колебаниями рельсовых путей железнодорожного транспорта при прохождении поездов. Основой для этого предложения явились разработки проф. И. С. Шейнина и проф. О. А. Савинова во ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева по защите верхнего бьефа гидротехнической плотины от сейсмического воздействия с помощью воздушной завесы [21]. Вынужденные колебания жилого здания были настолько интенсивными, что нарушали санитарные нормы проживания в нём людей, которые обращались с многочисленными жалобами в различные инстанции, вплоть до руководства страны. Для реализации данного предложения было выполнено периодическое вибропогружение штанги с консолями в нижней части с верхними отверстиями для воздухонасыщения водонасыщенного грунта вдоль границы между рельсовыми путями и жилым зданием. После этого вибрация здания фактически прекратилась. К сожалению, никаких специальных исследований, в том числе измерений параметров колебаний грунтов оснований и конструкций данного здания, в этом случае не велось.

Следует отметить, что результаты статического зондирования, проведенные до и после выполнения процесса воздухонасыщения, показали очень значительное уплотнение грунта в промежутке между рельсовыми путями и зоной воздухонасыщения. В результате многократного уплотнения за счет отражения волны деформаций от воздуходержащей завесы грунт между ней

и рельсовыми путями уплотнился настолько, что фактически стал выполнять функцию отражателя волн деформации, вызванных колебаниями подвижного состава, по границе подверженного воздухом насыщению грунта. Данное заключение свидетельствует о том, что после возможной ликвидации воздушной завесы вследствие многократного вибродинамического воздействия при прохождении поездов по рельсовым путям эффект виброизоляции здания сохраняется. С высокой вероятностью представляется, что данным способом могут успешно решаться задачи по вибродинамической и сейсмической безопасности зданий и сооружений в портовом гидротехническом строительстве.

### Заключение

1. Повышение эксплуатационной безопасности и надежности портовых гидротехнических сооружений процессу разжижения песчаных грунтов при образовании новых и расширения существующих территорий, в том числе песчаных насыпок городских и портовых набережных, может быть обеспечено уплотнением грунтов оснований и сооружений.

2. В настоящее время в России разработаны принципиально новые способы уплотнения и виброизоляции грунтов оснований, позволяющие наряду с достижением более высокой плотности грунтов оснований обеспечить существенное снижение влияния вредных вибродинамических воздействий на близлежащие здания и коренные грунты основания. Последнее позволяет расширить область применения динамических методов уплотнения песчаных водонасыщенных грунтов для расширения существующих портовых гидротехнических комплексов при наличии в их основании слабых глинистых грунтов, обладающих структурной прочностью.

3. Как показали проведенные исследования, способ последовательного взрывания зарядов позволяет на 30 – 40 % увеличить относительные осадки уплотняемого основания и достигнуть степени плотности грунтов основания  $I_D$  не менее 0,6 – 0,8, что практически обеспечивает устойчивость структуры песчаных грунтов их разжижению в основании зданий и сооружений от техногенных вибродинамических и сейсмических воздействий.

4. Кроме того, применение способа последовательного взрывания зарядов для уплотнения грунтов оснований позволяет в 2,5 – 3 раза сократить безопасные расстояния для зданий и сооружений. При этом дополнительное создание специальной защиты в виде слоя из аэрированного грунта вдоль границы уплотняемого основания позволяет практически полностью ликвидировать опасность техногенных вибродинамических воздействий, возникающих при динамическом уплотнении грунтов оснований нового строительства, на близлежащие здания и сооружения.

*Автор статьи выражает благодарность проф. М. А. Колосову и проф. П. А. Гарибину, которые сфокусировали внимание на большем применении его исследований в области портового гидротехнического строительства, обеспечения его безопасности и надёжности, поскольку эти исследования в целом и были направлены, прежде всего, на повышение эксплуатационной безопасности и надёжности гидротехнического строительства.*

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Евтушенко Г. Н.* Северные порты России / Г. Н. Евтушенко, М. А. Колосов, А. В. Силин, Р. М. Нарбут. — СПб.: Гидрометеоздат, 2006. — 340 с.
2. *Будин А. Я.* Городские и портовые набережные / А. Я. Будин. — СПб.: Изд-во «Политехник», 2014. — 424 с.
3. *Гарибин П. А.* Водные пути и порты. Путевые работы / П. А. Гарибин, Н. Д. Беляев. — СПб.: Изд-во СПбПУ Петра Великого, 2014. — 120 с.
4. *Смирнов Г. Н.* Порты и портовые сооружения / Г. Н. Смирнов [и др.]. — М.: Изд-во АСВ, 2003. — 464 с.
5. *Florin V. A.* Liquefaction of Saturated Sandy Soils / V. A. Florin, P. L. Ivanov // Proceeding of the 5th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. — 1961. — Vol. 1. — Pp. 107–111.

6. Иванов П. Л. Уплотнение несвязных грунтов взрывами / П. Л. Иванов. — М.: Недра, 1983. — 230 с.
7. Seed H. B. Ground motions and soil liquefaction during earthquakes / H. B. Seed, I. M. Idriss. — USA, Oakland, C.A.: Earthquake Engineering Research Institute, 1982. — 134 p.
8. Idriss I. M. Soil liquefaction during earthquakes / I. M. Idriss, R. W. Boulanger. — USA, California: Earthquake Engineering Research Institute, 2008. — 262 p.
9. Ishihara K. Soil Behaviour in Earthquake Geotechnic / K. Ishihara. — Oxford University Press, 1996. — 360 p.
10. Boulanger R. W. Remediation of liquefaction effects for a dam using soil-cement grids: Centrifuge and numerical modeling / R. W. Boulanger, M. Khosravi, A. Khosravi, D. W. Wilson, A. Pulido, W. Yunlong // Proceedings of the 19th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. — Seoul, Korea, 2017. — Pp. 2477–2480.
11. Towhata I. On ageing of liquefaction resistance of sand Russian methods and equipment for spatial vibro-compaction foundations and structures / I. Towhata, S. Goto, Y. Taguchi, T. Hayashida, Y. Shintaku, Y. Hamada // Japanese Geotechnical Society Special Publication. — 2016. — Vol. 2 (2015). — No. 21. — Pp. 800–805. DOI: 10.3208/jgssp.JPN-072.
12. Минаев О. П. Разработка динамических методов глубинного уплотнения слабосвязанных грунтов оснований / О. П. Минаев // Основания, фундаменты и механика грунтов. — 2013. — № 6. — С. 21–23.
13. Минаев О. П. Russian methods and equipment for spatial vibrocompaction foundations and structures / O. P. Minaev // Japanese Geotechnical Society Special Publication. — 2016. — Vol. 2 (2015). — No. 80. — Pp. 2747–2750. DOI: 10.3208/jgssp.TC305-11.
14. Минаев О. П. Significant Development of Explosive Compaction Method for Sandy Foundations / O. P. Minaev // Proceedings of the 19th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. — Seoul, Korea, 2017. — Pp. 2591–2594.
15. Пат. 2060320 Российская Федерация, МПК E02D 3/10. Способ уплотнения слабосвязных грунтов взрывами / О. П. Минаев, А. П. Крутов; заяв. и патентообл. АО открытого типа «Всероссийский государственный научно-исследовательский институт гидротехники им. Б. Е. Веденеева». — № 93 93011922; заявл. 05.03.1993; опубл. 20.05.1996.
16. Пат. 1770526 Российская Федерация, МПК E02D 3/10. Способ уплотнения грунта / О. П. Минаев, О. А. Савинов, Ю. К. Севенард, П. Л. Иванов; заяв. и патентообл. Производственное строительно-монтажное объединение «Ленгидроэнергоспецстрой», Всесоюзный научно-исследовательский институт гидротехники им. Б. Е. Веденеева. — № 90 4791452; заявл. 23.02.1990; опубл. 23.10.1992.
17. Рекомендации по оценке устойчивости гидротехнических сооружений из грунтовых материалов при сейсмозврывных и эксплуатационных динамических воздействиях: П 29-86/ВНИИГ. — Л., 1986. — 44 с.
18. Ляхов Г. М. Волны в плотных средах и нагрузки на сооружения / Г. М. Ляхов, Н. И. Полякова. — М.: Недра, 1967. — 232 с.
19. Ставницер Л. П. Сейсмостойкость оснований и фундаментов: монография / Л. П. Ставницер. — М.: Изд-во Ассоциации Строительных вузов, 2010. — 448 с.
20. Уздин А. М. Об эффективности применения экранов в грунте для сейсмозащиты зданий и сооружений / А. М. Уздин, М. В. Фрезе // Основания, фундаменты и механика грунтов. — 2011. — № 1. — С. 17–19.
21. Динамика гидросооружений ГЭС / Науч. ред. д-р техн. наук И. С. Шейнин. — Л.: Изд-во «Энергия», Ленингр. отд., 1970. — 285 с.

## REFERENCES

1. Evtushenko, G. N., M. A. Kolosov, A. V. Silin, and R. M. Narbut. *Severnye porty Rossii*. SPb: Gidrometeoizdat, 2006.
2. Budin, A. Ya. *Gorodskie i portovye naberezhnye*. SPb.: Izd-vo Politekhnik, 2014.
3. Garibin, P. A., and N. D. Belyaev. *Vodnye puti i porty. Putevye raboty*. SPb.: Izd-vo SPbPU Petra Velikogo, 2014.
4. Smirnov, G. N., et al. *Porty i portovye sooruzheniya*. M.: Izd-vo ASV, 2003.
5. Florin, V. A., and P. L. Ivanov. “Liquefaction of Saturated Sandy Soils.” *Proceeding of the 5th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*. Vol. 1. 1961. Pp. 107–111.
6. Ivanov, P. L. *Uplotnenie nesvyaznykh gruntov vzryvami*. M.: Nedra, 1983.

7. Seed, H. B., and I. M. Idriss. *Ground motions and soil liquefaction during earthquakes*. USA, Oakland, C.A.: Earthquake Engineering Research Institute, 1982.
8. Idriss, I. M., and R. W. Boulanger. *Soil liquefaction during earthquakes*. USA, California: Earthquake Engineering Research Institute, 2008.
9. Ishihara, K. *Soil Behaviour in Earthquake Geotechnic*. Oxford University Press, 1996.
10. Boulanger, R. W., M. Khosravi, A. Khosravi, D. W. Wilson, A. Pulido, and W. Yunlong. "Remediation of liquefaction effects for a dam using soil-cement grids: Centrifuge and numerical modeling." *Proceedings of the 19th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*. Seoul, Korea, 2017: 2477–2480.
11. Towhata, Ikuo, Shigeru Goto, Yuichi Taguchi, Toshihiko Hayashida, Yuki Shintaku, and Yuki Hamada. "On ageing of liquefaction resistance of sand Russian methods and equipment for spatial vibrocompaction foundations and structures." *Japanese Geotechnical Society Special Publication 2(2015) (2016)*: 800–805. DOI: 10.3208/jgssp.JPN-072.
12. Minaev, O. P. "Development of dynamic methods for deep compaction of slightly cohesive bed soils." *Soil Mechanics and Foundation Engineering 6 (2013)*: 21–23.
13. Minaev, Oleg P. "Russian methods and equipment for spatial vibrocompaction foundations and structures." *Japanese Geotechnical Society Special Publication 2.80 (2016)*: 2747–2750. DOI: 10.3208/jgssp.TC305-11.
14. Minaev, O. P. "Significant Development of Explosive Compaction Method for Sandy Foundations." *Proceedings of the 19th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*. Seoul, Korea, 2017: 2591–2594.
15. Minaev, O.P., and A.P. Krutov. RU 2 060 320 C1, IPC E 02 D 3/10. Sposob uplotneniya slabosvyaznykh gruntov vzryvami. Russian Federation, assignee. Publ. 20 May 1996.
16. Minaev, O.P., O.A. Savinov, Yu.K. Sevenard, and P.L. Ivanov. RU 1 770 526 A1, IPC E 02 D 3/10. Russian Federation, assignee. Publ. 23 Oct. 1992.
17. *Rekomendatsii po otsenke ustoichivosti gidrotekhnicheskikh sooruzhenii iz gruntovykh materialov pri seismovzryvnykh i ekspluatatsionnykh dinamicheskikh vozdeistviyakh: P 29–86/VNIIG*. L., 1986.
18. Lyakhov, G.M., and N.I. Polyakova. *Volny v plotnykh sredakh i nagruzki na sooruzheniya*. M.: Nedra, 1967.
19. Stavnitser, L.R. *Ceismostoikost' osnovanii i fundamentov: monografiya*. M: Izdatel'stvo Assotsiatsii Stroitel'nykh vuzov, 2010.
20. Uzdin, A.M., and M.V. Freze. "Effectiveness of ground shields as seismic protection for buildings and structures." *Soil Mechanics and Foundation Engineering 48.1 (2011)*: 24–27. DOI: 10.1007/s11204-011-9123-y.
21. Sheinin, I.S., ed. *Dinamika gidrosooruzhenii GES*. L.: Izd-vo Energiya, Leningr. otd-nie, 1970.

**ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ**

**Минаев Олег Петрович** —  
 кандидат технических наук  
 ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени  
 адмирала С. О. Макарова»  
 198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,  
 ул. Двинская, 5/7  
 e-mail: [minaev.op@bk.ru](mailto:minaev.op@bk.ru), [kaf\\_port@gumrf.ru](mailto:kaf_port@gumrf.ru)

**INFORMATION ABOUT THE AUTHOR**

**Minaev, Oleg P.** —  
 PhD  
 Admiral Makarov State University of Maritime  
 and Inland Shipping  
 5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,  
 Russian Federation  
 e-mail: [minaev.op@bk.ru](mailto:minaev.op@bk.ru), [kaf\\_port@gumrf.ru](mailto:kaf_port@gumrf.ru)

*Статья поступила в редакцию 14 октября 2017 г.  
 Received: October 14, 2017.*