

IMPROVEMENT OF OPERATIONAL SAFETY AND RELIABILITY OF PORT HYDROTECHNICAL STRUCTURES TO THE LIQUEFACTION OF SAND SOILS OF THE BASES BY A NEW VIBRATION METHOD DEPTH COMPACTION

O. P. Minaev

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

Sandy grounds are widely used to form new and expand existing areas of port hydraulic structures. Increase of operational safety and reliability of port hydraulic structures to the process of liquefaction of sand soils of ground, prevention of uneven sediments and subsidence of ground, formation of caverns and cavities in sandy backfilling and foundation of port facilities under static and especially dynamic (seismic) loads can be ensured by their compaction. This prevents unacceptable deformations and destruction of buildings and structures of the port complex, reliable operation of lifting cranes, stability of the fencing and berthing facilities of the embankments of ports, etc. The article presents the results of theoretical substantiation on the analytical calculation model developed by the author of the article and field tests of the method of deep vibro compaction of bases with a known vibroinstallation, showing its shortcomings. These shortcomings were most clearly manifested when compacting a thick layer of sandy bases (9 m and more). The article also shows that the shortcomings of a well-known vibration plant can be excluded or significantly reduced by using a vibrating packer with radial elements placed at a given height at the bottom of the seal rod. This allows to increase the technical characteristics of the vibration plant by increasing the depth of compaction by a factor of 1.5 – 2. In the experimental tests, an improvement in the uniformity of compacting has been achieved to the values of the relative density of the soil base deposits I_D from 0.5 to 0.8 in depth and in the radius of action of the sealant. At the same time, a significant increase in the physical and mechanical characteristics of the small and medium sands of the bases was achieved: up to values of the elastic modulus E within 30-40 MPa and an internal friction angle of 32 ... 34 degrees. The developed new method for deep compaction of sand bases with a more modern vibro installation is recommended to be carried out with a reliable and economical VPP-2 vibrator for Russian production. This vibrator can be also successfully used in port hydraulic engineering for dipping the tongue to a depth of at least 12-15 m. In recent years, the main results of the theoretical and experimental studies of the author of the article have been confirmed by independent studies of German specialists. These theoretical and experimental studies of German specialists are based on the compaction of sandy base grounds to a depth of up to 10 m by a vibrating fleet created on the basis of a heavy deep-sea vibrator.

Keywords: safety, reliability, hydraulic engineering structures, vibration method, vibrating installation, sand bases, deep compaction, liquefaction soil, modernized sealant, new method compaction.

For citation:

Minaev, Oleg P. "Improvement of operational safety and reliability of port hydrotechnical structures to the liquefaction of sand soils of the bases by a new vibration method depth compaction." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 10.1 (2018): 106–121. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-1-106-121.

УДК 624.2:624.131.3:624.138.22

ПОВЫШЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ И НАДЕЖНОСТИ ПОРТОВЫХ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ ПРИ РАЗЖИЖЕНИИ ПЕСЧАНЫХ ГРУНТОВ ОСНОВАНИЙ НОВЫМ ВИБРАЦИОННЫМ СПОСОБОМ ГЛУБИННОГО УПЛОТНЕНИЯ

О. П. Минаев

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

Для образования новых и расширения существующих территорий портовых гидротехнических сооружений широко применяются песчаные грунты. Повышение эксплуатационной безопасности и надежности портовых гидротехнических сооружений процесса разжижения песчаного грунта, предотвращение неравномерных осадок и просадок грунта, образования каверн и полостей в песчаной засыпке и основании портовых сооружений при статических и особенно динамических (сейсмических) нагрузках может быть обеспечено их уплотнением. Тем самым предотвращаются недопустимые деформации и разрушение зданий и сооружений портового комплекса, обеспечивается надежная работа грузоподъемных кранов, устойчивость оградительных и причальных сооружений набережных портов и т. п. В статье приведены результаты теоретического обоснования на примере разработанной аналитической расчетной модели и полевых испытаний метода глубинного виброуплотнения оснований с помощью известной виброустановки, показывающие её недостатки. Данные недостатки наиболее ярко проявились при уплотнении мощной толщи песчаных оснований (9 м и более). В статье также показано, что недостатки известной виброустановки могут быть исключены или существенно снижены путем применения виброуплотнителя с размещением радиальных элементов на заданной высоте в нижней части штанги уплотнителя. Это позволяет повысить технические характеристики виброустановки путем увеличения глубины уплотнения в 1,5 – 2 раза. В опытных испытаниях достигнуто улучшение равномерности уплотнения до значений относительной плотности сложения грунтов основания I_D от 0,5 до 0,8 по глубине и в радиусе действия уплотнителя. При этом было достигнуто значительное увеличение физико-механических характеристик мелких и средних песков оснований: до значений модуля упругости E в пределах 30 ... 40 МПа и угла внутреннего трения $\varphi = 32 - 34^\circ$. Разработанный новый способ глубинного уплотнения песчаных оснований с более современной виброустановкой рекомендуется осуществлять с надежным и экономичным вибропогружателем ВПП-2 российского производства. Данный вибропогружатель может также успешно применяться в портовом гидротехническом строительстве для погружения шпунта на глубину не менее 12 – 15 м. В последние годы основные результаты теоретических и экспериментальных исследований автора статьи были подтверждены независимыми исследованиями немецких специалистов, основанными на уплотнении песчаных грунтов оснований на глубину до 10 м «Виброфлотом» с помощью виброуплотнителя, созданного на базе тяжелого глубинного вибратора.

Ключевые слова: безопасность, надежность, гидротехнические сооружения, вибрационный метод, вибрационная установка, песчаные основания, глубинное уплотнение, разжижение грунта, модернизированный уплотнитель, новый способ уплотнения.

Для цитирования:

Минаев О. П. Повышение эксплуатационной безопасности и надежности портовых гидротехнических сооружений при разжижении песчаных грунтов оснований новым вибрационным способом глубинного уплотнения / О. П. Минаев // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 1. — С. 106–121. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-1-106-121.

Введение (Introduction)

Песчаные грунты широко применяются для образования новых и расширения существующих территорий портовых гидротехнических сооружений, в том числе песчаных насыпок городских и портовых набережных [1] – [4].

При этом опыт строительства комплекса защитных сооружений (КЗС) г. Санкт-Петербурга от наводнений, портов в Северо-Западном регионе России (г. Санкт-Петербург и Ленинградская область), таких как многофункциональные морские перегрузочные комплексы (ММПК) «Бронка» и «Кронштадт» в районе КЗС (рис. 1 и 2), Морской торговый порт Усть-Луга и нефтеналивной терминал Приморск, показывают, что мощности грунтов песчаной отсыпки и подводного намыва достигают значительных величин. Так, самый глубоководный порт «Бронка» Большого порта Санкт-Петербурга позволяет принимать судна длиной до 547 м, шириной до 50 м и осадкой до 13 м, а крупнейший нефтеналивной терминал «Приморск» имеет максимальную глубину у причала 18,2 м. Разжижение водонасыщенных песчаных грунтов оснований таких массивов грунта является наиболее опасным явлением для сооружений и зданий различных гидротехнических сооружений при техногенных динамических воздействиях и землетрясениях.



Рис. 1. Местоположение многофункционального морского перегрузочного комплекса «Бронка» Большого порта Санкт-Петербурга



Рис. 2. План-схема ММПК «Бронка» с видом выхода на КАД комплекса защитных сооружений г. Санкт-Петербурга от наводнений

Проведение первых детальных исследований процесса разжижения песчаных грунтов, их консолидации и динамического уплотнения взрывным методом началось в середине прошлого века под руководством проф. П. Л. Иванова применительно к строительству крупных плотин на песчаных основаниях [5], [6]. Эти исследования базировались на теории консолидации грунтов, созданной проф. В. А. Флориным.

За рубежом, в особенности в США и Японии, ведутся масштабные исследования явления разжижения грунтов оснований и сооружений [7] – [12]. Данные исследования проводились в США проф. Seed H. B. и были продолжены его учениками проф. I. M. Idriss и проф. R. W. Boulanger [6] – [8]. Многолетние исследования проф. К. Ishihara (Япония) были обобщены ученым в монографии «Поведение грунтов при землетрясениях» (СПб., 2006, пер. на рус. яз.) [9].

Наиболее действенным способом повышения техногенной и сейсмической безопасности и надёжности при разжижении грунтов оснований и сооружений является их уплотнение [13]. Для этого имеются различные динамические методы уплотнения: взрывной, тяжёлыми трамбовками и вибрационный глубинными уплотнителями. В настоящее время применение указанных методов в зарубежной строительной практике основано на разработках российских специалистов 50 – 60-х гг. XX в.

В частности, в 1960 г. в России во ВНИИГС (Всесоюзный НИИ гидромеханизации, санитарно-технических и специальных строительных работ) был создан пространственный уплотнитель продольного вибрирования, получивший в дальнейшем общепринятое название «виброёлочка», для глубинного уплотнения песчаных оснований [14]. Данный уплотнитель изготавливался из трубчатой штанги, которую с целью повышения производительности путем увеличения радиуса действия уплотнителя вдоль ее длины снабжали радиальными элементами для придания уплотнителю пространственной структуры.

Пространственная структура представляет собой многоярусную систему, напоминающую «ёлочку», содержащую в каждом ярусе по четыре крестообразно расположенных и приваренных к штанге пластинчатых элемента, имеющих в вертикальной плоскости форму трапеции, сужающейся к внешней окружности. Высота участка штанги с пространственной структурой задается равной проектной глубине уплотняемого грунта основания. Для искусственного насыщения водой уплотняемого грунта основания непосредственно в процессе работы уплотнителя трубчатая штанга снабжена в нижнем конце соплом и в верхней части патрубком для подачи под давлением воды в грунт основания. Уплотнитель через фланец в верхней части трубчатой штанги жестко соединен болтами с вибропогружателем.

В качестве вибропогружателя использовался вибропогружатель с подрессоренной пригрузкой (ВПП-2) в настоящее время производственной марки В-402 (В-402ВЧ). Вибропогружатель ВПП-2 был разработан российскими учеными проф. О. А. Савиновым и А. Я. Лускиным [15]. Данный вибропогружатель состоит из двух составных частей: вибрирующей части и пригрузочной массы, изолированной от вибрации. В вибрирующую часть входит вибратор и наголовник, а в изолированную (пригрузочную) от вибрации — электродвигатель и пригрузочные плиты. При этом обе части соединяются системой пружин.

Вибропогружатель ВПП-2 с электроприводом широко использовался в строительстве в различных странах мира в основном для погружения шпунта в водонасыщенные песчаные и слабые глинистые грунты оснований, а также для виброуплотнения рыхлых грунтов песчаных оснований и сооружений пространственным виброуплотнителем продольного вибрирования. Несмотря на высокую конкуренцию с современными мощными вибропогружателями с гидравлическим приводом зарубежного производства, он продолжает выпускаться на Охтинском заводе строительных машин в г. Санкт-Петербурге.

Собранная вибрационная установка, включающая вибропогружатель и уплотнитель, подвешивается на крюке крана. Процесс уплотнения описанной вибрационной установкой на заданной точке уплотнения основания включает погружение в грунт уплотнителя на заданную глубину с последующим подъемом уплотнителя на поверхность грунта основания. На всем промежутке времени погружения и подъема уплотнителя через сопло в нижнем конце штанги в грунт основания под давлением подается вода. При этом динамическое возбуждение вибропогружателя на песчаную водонасыщенную среду вызывает одновременное воздействие на неё во всем объеме массива грунта в радиусе действия уплотнителя на глубину его погружения. Песок при вибрации уплотняется вследствие более компактной переукладки его части после разжижения.

Уплотнитель типа «виброёлочка» имеет достаточно простую конструкцию, состоящую из сварных деталей, не требующих станочной обработки, что позволяет изготавливать его непосредственно на объекте строительства. В связи с этим уплотнение песчаных грунтов основания виброустановкой конструкции ВНИИГС получило широкое применение как в отечественной, так и зарубежной практике строительства.

Разработанный на основе вибропогружателя ВПП-2 (для погружения и извлечения шпунта) данный метод уплотнения оснований виброустановкой продольного вибрирования с пространственным уплотнителем в виде «виброёлочки» применяется для глубинного виброуплотнения песчаных грунтов оснований как водонасыщенных или маловлажных, так и их сочетания. При этом глубина уплотнения грунтов основания такой виброустановкой не превышает 6 м, что является явно недостаточным в современных условиях гидротехнического строительства.

В дальнейшем совершенствование метода глубинного уплотнения грунтов оснований данной виброустановкой во ВНИИГС велось главным образом по пути разработки более мощного вибропогружателя. Для этих целей в этом институте был создан сравнительно более тяжелый вибропогружатель ВШ-1, работающий как в вибрационном, так и в ударно-вибрационном режиме [16]. Ввиду отсутствия теоретического обоснования уплотнения грунтов оснований такой виброустановкой, все разработки ВНИИГС были основаны на результатах опытных испытаний. Известные испытания сопровождались полевыми и лабораторными определениями физико-механических характеристик грунтов оснований, выполненных на лабораторной базе данного научно-исследовательского института.

Поиск других направлений совершенствования данного метода уплотнения потребовал от автора статьи модернизации конструкции виброуплотнителя, облегчающей работу вибропогружателя и повышающей его надежность, а также увеличивающей глубину уплотнения и улучшающей процесс уплотнения грунтов основания. Суть модернизации конструкции виброуплотнителя заключается в размещении его пространственных элементов только в нижней части штанги уплотнителя на заданной высоте уплотнения основания [17], [18].

Целью статьи является представление результатов исследований автора, направленных на повышение безопасности и надёжности портовых гидротехнических сооружений процессу разжижения грунта, предотвращению неравномерных осадок и просадок грунта, образованию каверн и полостей в песчаной засыпке и основании портовых сооружений при статических и особенно динамических (сейсмических) нагрузках. Тем самым полученные результаты позволяют предотвратить недопустимые деформации и разрушение зданий и сооружений портового комплекса, обеспечить надежную работу грузоподъёмных кранов, устойчивость оградительных и причальных сооружений набережных портов и т. п. за счёт уплотнения песчаных грунтов насыпок и оснований портовых сооружений с помощью использования вибрационной установки с модернизированным уплотнителем для реализации нового эффективного вибрационного способа глубинного уплотнения, разработанного автором статьи [18]. В статье приведены результаты теоретических и экспериментальных натурных исследований практического внедрения.

Рассмотренные в статье теоретические и экспериментальные исследования имеют научную и практическую значимость как в части разработки расчётной модели воздействия вибропогружателя на песчаные водонасыщенные грунты основания с помощью пространственного уплотнителя продольного вибрирования, так и в части проведения сравнительных теоретических исследований и опытного подтверждения натурными экспериментальными исследованиями эффективности уплотнения оснований виброуплотнителем модернизированной конструкции, а также практического применения разработанной вибрационной установки и нового способа глубинного вибрационного уплотнения песчаных оснований мощной толщи в производственных условиях на объекте гидротехнического строительства. Об основных результатах данных исследований автором статьи был сделан доклад на 15-й Азиатской региональной конференции по механике грунтов и инженерной геотехнике «Новые инновации и устойчивости» (15ARC), которая была проведена под эгидой японского геотехнического общества (JGS) в г. Фукуока, Япония 9 – 13 ноября 2015 г. [19].

Методы и материалы исследований (Research methods and materials)

В теоретических исследованиях была разработана аналитическая расчетная модель воздействия вибропогружателя на песчаные водонасыщенные грунты основания с помощью пространственного уплотнителя продольного вибрирования. В соответствии с исследованиями проф. О. А. Савинова и проф. И. И. Блехмана [20], [21] для сыпучей среды наилучшее уплотнение имеет место при условии

$$A\omega^2 = (0,9 - 1)g, \quad (1)$$

где A — амплитуда вибрации; ω — круговая частота колебаний; g — ускорение свободного падения.

Известно [17], что для вязких сред амплитуда вибрации убывает с расстоянием x от источника колебаний по экспоненциальному закону:

$$A = A_0 e^{-\frac{x}{\delta}} \quad (2)$$

или при условии, что

$$\delta \approx \sqrt{\frac{2\nu}{\omega}},$$

где ν — кинематическая вязкость жидкой среды.

В результате выполненных преобразований можно записать

$$A = A_0 e^{-x\sqrt{\frac{\omega}{2\nu}}}. \quad (3)$$

Формула (2) справедлива также для рассматриваемой уплотняемой водонасыщенной песчаной среды, если под ν и δ понимать экспериментально определяемые коэффициенты.

На расстоянии $x = r$ от источника колебаний при заданном значении круговой частоты колебаний ω критическая амплитуда колебаний $A = A_r$, т. е. минимально допустимая для полного разжижения грунта в уплотняемой зоне, убывает по экспонентному закону, так что

$$A_r = A_0 e^{-\frac{r}{\delta}}. \quad (4)$$

Из формулы (4) имеем

$$\ln \frac{A_r}{A_0} = -\frac{r}{\delta}, \quad (5)$$

откуда определяется, что

$$\delta = -\frac{r}{\ln \frac{A_r}{A_0}} = \frac{r}{\ln \frac{A_0}{A_r}}. \quad (6)$$

Известно, что

$$A_0 \approx \frac{P_0}{m\omega^2} = \frac{P_0}{m(2\pi f)^2}, \quad (7)$$

где P_0 — вынуждающая сила вибропогружателя; m и f — соответственно масса вибрирующего элемента и частота его колебаний.

С учетом динамического сопротивления $P^{\text{дин}}$ погружению вибрирующего элемента уплотнителя формула (7) приобретает вид

$$A_0 = \frac{P_0 - P^{\text{дин}}}{m\omega^2} = \frac{P_0 - (P_{\text{тр}}^{\text{дин}} + P_{\text{лоб}}^{\text{дин}})}{(m_{\text{в}} + m_{\text{упл}})(2\pi f)^2}, \quad (8)$$

где $m_{\text{в}}$ и $m_{\text{упл}}$ ($m_{\text{упл}}^*$) — соответственно масса вибропогружателя и уплотнителя конструкции ВНИИГС (модернизированной конструкции); $P_{\text{тр}}^{\text{дин}}$ и $P_{\text{лоб}}^{\text{дин}}$ — сила динамического сопротивления, соответственно, трению по боковой поверхности уплотнителя и лобовому его погружению, кН.

Как известно из исследований проф. М. Г. Цейтлина и проф. В. В. Верстова [16], в том числе и из исследований автора статьи [17], при динамическом погружении свай в водонасыщенные песчаные грунты за счет встряхивания и возникновения избыточного порового давления происходит снижение эффективного сопротивления грунта сдвигу и временное уменьшение сопротивления погружению сваи. В частности, силы динамического сопротивления при вибропогружении (извлечении) меньше соответствующих статистических в водонасыщенных песках по трению на боковой поверхности в 4,5 – 6 раз и лобовому погружению в 2,5 – 3 раза.

Согласно исследованиям М. Г. Цейтлина, амплитуда колебаний от источника уменьшается пропорционально частоте, поэтому при какой-то исходной ω_0 запишем

$$r = \delta \sqrt{\frac{\omega_0}{\omega}} \ln \frac{A_{0\text{исл}}}{A_r}, \quad (9)$$

где $A_{0\text{исл}}$ — амплитуда колебаний уплотнителя с учетом сил динамического бокового и лобового сопротивлений погружению уплотнителя в грунты уплотняемого основания на глубине погружения уплотнителя, равной $h_{\text{сл}}$, т. е. с увеличением круговой частоты колебаний ω эффективное расстояние от источника колебаний убывает.

Необходимые для расчетов технические характеристики вибропогружателя В-402 выбираются из таблицы, а виброустановки ВУУП-6 принимаются согласно [16].

Сравнительные характеристики вибропогружателей В-402 и ВШ-1 конструкции ВНИИГС

№ п/п.	Показатель	Марка	
		В-402 В-402ВЧ (ВПП-2)	ВШ-1 ВШ-1М
1	Номинальная мощность приводного электродвигателя, кВт	55	44 (22 × 2)
2	Статический момент массы дебалансов, кг · см	1200, 600	2500
3	Частота колебаний, Гц	24,33	13, 16, 20
4	Максимальная амплитуда вынуждающей силы, кН	270,256	400
5	Усилие полного сжатия пружин амортизатора, кН	120	290
6	Тип наголовника	Клиновой, гидравлический	Клиновой, гидравлический
7	Масса вибрирующей (ударной) части, кг	940	3000
8	Общая масса, кг	2710	5000
9	Габаритные размеры, мм: – в плане – высота	1550 × 1 095 1980	1280 × 1250 2740

Примечание. ВПП-2, В402, В402ВЧ — вибрационные машины; ВШ-1 и ВШ-1М — вибрационные машины с перенастройкой (при необходимости) на ударно-вибрационный режим.

Для определения увеличения пористости грунта при виброуплотнении, по аналогии с зависимостью проф. В. А. Флорина для консолидации разжиженного слоя грунта под действием только гравитационных сил [6], можно записать

$$n_2 = n_1 - \frac{t_{\text{упл}}}{r_1} (1 - n_1) K_{\phi 1}, \quad (10)$$

где n_2 и n_1 — соответственно конечная и начальная пористость грунта; $t_{\text{упл}}$ — время послойного виброуплотнения грунта, с; $K_{\phi 1}$ — начальный коэффициент фильтрации уплотняемого слоя грунта, м/с; $r_1 = 1$ м — толщина уплотняемого слоя грунта, эквивалентная одному метру.

Данная формула была применена проф. П. Л. Ивановым при определении времени уплотнения основания при взрывном методе уплотнения песчаных оснований [6]. Однако, согласно мнению автора статьи, процессы консолидации водонасыщенных песчаных оснований при виброуплотнении и уплотнении взрывами существенно отличаются, и задаваемое в формуле (10) время виброуплотнения грунта должно быть скорректировано с учетом постоянного градиента напора поровой воды разжиженного слоя грунта основания в процессе виброуплотнения. Для этого используется зависимость, заимствованная из работы [6], для уплотнения грунтов основания под действием фильтрационных сил следующего вида:

$$t_{\text{упл}}^* = \frac{\gamma_w}{\gamma_{\text{взв}}} \frac{r_1}{K_{\phi 1}} \frac{n_1 - n_2}{1 - n_1} \left(\frac{1}{1 - \frac{K_{\phi 2}}{K_{\phi 1}(1 - n_1) \frac{p_1}{\gamma_{\text{взв}} h}}} \right), \quad (11)$$

где p_1 — градиент напора в пределах разжиженного слоя грунта; $K_{\phi 2}$ — коэффициент фильтрации переукладываемой части грунта, принимаемый равным конечному значению коэффициента фильтрации после виброуплотнения переукладываемого слоя грунта.

Приняв $\gamma_w \approx \gamma_{\text{взв}}$ и $p_1 = \gamma_{\text{взв}} h$, а также с учётом того, что в результате уплотнения можно уменьшить коэффициент фильтрации песков от полупорядка до порядка [6], в формуле (11) вместо $t_{\text{упл}}$ может быть принято $t_{\text{упл}}^* = (2 - 3)t_{\text{упл}}$.

Для полученных значений пористости при определенных граничных значениях плотности грунта в рыхлом $\rho_d^{\text{рыхл}}$ и плотном $\rho_d^{\text{плотн}}$ сложениях по формуле

$$I_D = \frac{\rho_d^{\text{max}} (\rho_d - \rho_d^{\text{min}})}{\rho_d (\rho_d^{\text{max}} - \rho_d^{\text{min}})} \quad (12)$$

с использованием зависимости

$$n = 1 - \frac{\rho_d}{\rho_s}, \quad (13)$$

где $\rho_s = 2,65 \text{ г/см}^3$ — плотность частиц грунта; ρ_d — плотность скелета грунта, может быть вычислена относительная плотность I_D грунта основания до и после уплотнения.

Для проведения сравнительных численных расчетов достигаемой плотности грунтов основания в качестве основополагающего был принят график времени воздействия виброустановки конструкции ВНИИГС на грунты основания, приведенный на рис. 3, где также показаны графики для модернизированной виброустановки при размещении пространственных элементов в нижней части штанги уплотнителя на высоте, равной 1/2 и 1/3 глубины уплотнения.

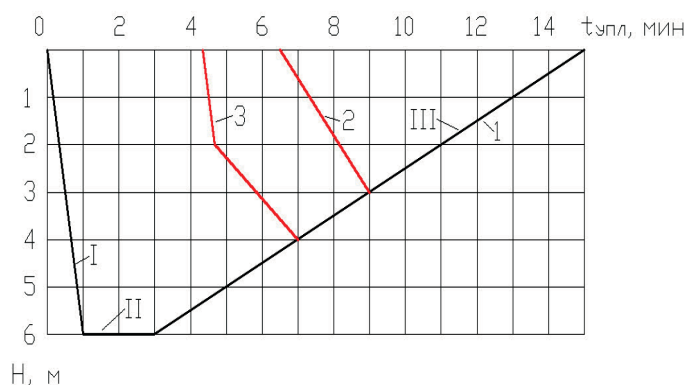


Рис. 3. Графики времени вибровоздействия виброустановки на грунты ее основания:

1 — виброустановка конструкции ВНИИГС; 2 и 3 — модернизированные виброустановки при высоте размещения пространственных элементов в нижней части штанги уплотнителя, соответственно, равной 1/2 и 1/3 глубины уплотнения; I — стадия погружения уплотнителя; II — стадия выдержки на заданной глубине уплотнения; III — стадия подъема уплотнителя

В опытных испытаниях на строительстве комплекса защитных сооружений (КЗС) Санкт-Петербурга от наводнений первоначально была апробирована виброустановка этой конструкции ВНИИГС, включающая вибропогружатель ВШ-1 и уплотнитель длиной 11,2 м из толстостенной трубы диаметром 133 мм, к которой по всей длине приварены горизонтальные ребра с шагом до 500 мм. С учетом этих ребер диаметр пространственного уплотнителя составил 700 мм. Для облегчения внедрения уплотнителя в грунт основания трубчатая штанга снабжалась крестообразным наконечником на ее острие. Вода к патрубку подавалась насосом с максимальной производительностью 300 м³/ч с напором 90 м вод. ст. и возможностью регулирования этих параметров с помощью заслонки, установленной в системе забора воды. В качестве базовой машины использовался кран грузоподъемностью 25 т.

Опытному уплотнению подвергались мелкие и средние пески основания на отсыпанной грунтовой дамбе до отметки около 4 м выше нулевого ординара. При этом глубина подводной отсыпки указанных песков составляла 5 м. Гранулометрический состав песков, уложенных в тело дамбы, представлен на рис. 4.

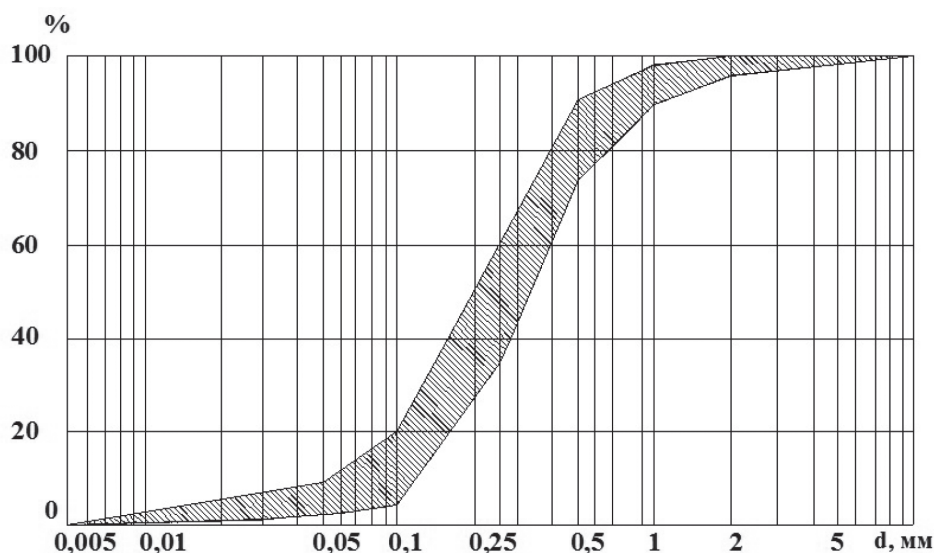


Рис. 4. Гранулометрический состав уложенного песчаного грунта в тело дамбы по данным отбора проб грунта из буровых скважин

Однако при дальнейшем уплотнении основания выявилась невысокая надежность этой виброустановки из-за частого выхода из строя вибропогружателя. Поэтому конструкция уплотнителя была видоизменена и проведены новые опытные работы по уплотнению грунтов основания на том же участке дамбы, модернизированной виброустановкой.

Результатом сравнительных натурных исследований виброустановки данной конструкции ВНИИГС и модернизированной конструкции виброуплотнителя явилось видоизменение конструкции уплотнителя, которое заключалось в срезке верхних горизонтальных ребер и сохранении их только на участке в 3,5 – 4,5 м в нижней части штанги. На основе результатов теоретических исследований был сделан вывод о том, что такое изменение конструкции уплотнителя позволяет облегчить работу вибропогружателя за счет потерь на внедрение и вибрирование горизонтальных ребер уплотнителя в поверхностном слое увлажненного грунта, оставшиеся ребра должны были обеспечить сохранение его уплотняющей способности в области подачи воды.

Результаты исследований (Research result)

На первом этапе теоретических исследований, используя зависимости (1) – (9), были определены исходные амплитуды и зона уплотнения по глубине погружения уплотнителя конструкции ВНИИГС, погружаемого вибропогружателем ВПП-2, в зависимости от значений сопротивления тре-

нию по боковой поверхности уплотнителя и лобового сопротивления его погружению. Полученные расчетные значения свидетельствуют о том, что при достигаемой глубине уплотнения, равной 6 м, зона уплотнения грунта вокруг «виброёлочки» увеличивается с 3 м до 4,06 м при приближении уплотнителя к поверхности грунтового основания. Аналогичные расчеты для виброустановки с модернизированным уплотнителем при сокращении количества пространственных элементов уплотнителя в три раза представлены кривыми графиков на рис. 5.

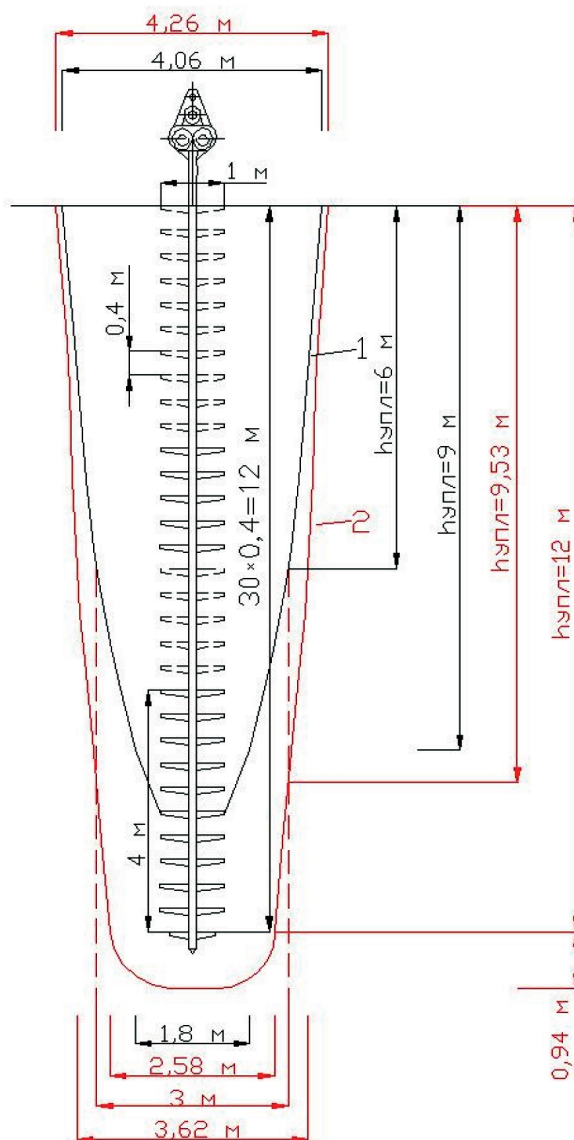


Рис. 5. Графики зон уплотнения водонасыщенных песчаных грунтов основания средней крупности на глубину 12 м виброустановкой модернизированной конструкции (1) и уменьшения зоны уплотнения грунта и глубины погружения уплотнителя конструкции ВНИИГС (2)

Из рис. 5 видно, что глубина уплотнения грунта увеличивается с 6 м (см. рис. 5, график 1) в виброустановке конструкции ВНИИГС до 9,53 м (см. рис. 5, график 2) при использовании модернизированного уплотнителя и сохранении размеров зоны уплотнения, равной 3 м для обоих типов уплотнителей, при прочих равных параметрах. При этом модернизированный уплотнитель позволяет увеличить глубину уплотнения основания до 12 м и более. Так, полученную расчетным путем на глубине 12 м зону уплотнения, равную 2,58 м (см. рис. 5, график 2), можно считать вполне приемлемой для эффективного применения виброустановки на заданную глубину уплотнения грунтов.

Проведенные аналогичные расчеты для установки конструкции ВНИИГС показали, что диаметр зоны уплотнения на глубине 9 м сокращается до 1,8 м, что является меньше необходимого (по данным ВНИИГС) минимального предела в 2 м (см. рис. 5, график 1). При этом уплотнитель данной конструкции на глубину 12 м вообще не может быть погружен.

Проведенными по формулам (10) – (13) расчетами достигаемой плотности грунтов основания было установлено, что при использовании установки конструкции ВНИИГС за счет большой разницы (до 7,5 раз и более) во времени виброуплотнения нижележащих слоев грунта по сравнению с вышележащими слоями существенно изменяется (от 0,41 до 0,33) пористость грунта в пределах заданной глубины уплотнения основания. При этом относительная плотность сложения грунта I_D изменяется от 0,3 до 0,9, а перепад данных по n и I_D достигает значений 0,08 и 0,6 соответственно.

При применении модернизированного виброуплотнителя путем сокращения максимально-го времени виброуплотнения примерно в два раза можно уменьшить разницу значений пористости по глубине уплотняемого основания до 0,03 – 0,04 при прочих равных условиях, тем самым значительно повысив равномерность уплотнения грунта в пределах заданной глубины.

Расчеты также показали, что при увеличении заданной глубины уплотнения данные показатели могут только ухудшаться у виброуплотнителя конструкции ВНИИГС, тогда как при использовании модернизированного виброуплотнителя имеется реальная возможность как увеличить минимально достигаемое значение пористости грунта от значения 0,41 до величин, равных 0,38 – 0,37 и менее, так и сократить их разницу по заданной глубине уплотняемого основания до значений, не превышающих 0,01 – 0,02. Все это позволяет модернизированным уплотнителем обеспечить достижение проектной плотности песчаного грунта $I_D \geq 0,6$ на заданную глубину основания и существенно улучшить равномерность уплотнения грунта в пределах уплотняемой толщи основания.

В результате экспериментальных исследований установки конструкции ВНИИГС было установлено, что после погружения и извлечения уплотнителя в грунты песчаного основания вокруг него появляется воронка оседания глубиной 0,8 – 1,2 м и диаметром 1,5 – 2 м. Данные статического зондирования показали, что грунт в целом уплотнялся в радиусе до 3 м от центра уплотнителя на глубину до 9 м. Наиболее значительное уплотнение водонасыщенных песков ниже ординара происходило вблизи от центра уплотнителя, а уже на расстоянии 0,5 м от него снижалось. При этом в центральной зоне происходило разрыхление поверхностного слоя песка на глубину 1,5 – 2 м и более в результате размыва грунта напором воды при вытаскивании уплотнителя. Попытка прекращения подачи воды при вытаскивании уплотнителя из песчаного основания приводила к его заклиниванию в грунте.

Испытания модернизированного уплотнителя с вибропогружателем В-401 производились при шаге погружения 3×3 м. При этом применялся кран, гораздо меньшей грузоподъемности. По данным статического зондирования, глубина уплотнения основания составила 9 м. При этом достигалось более равномерное уплотнение грунта как в центральной зоне вокруг уплотнителя, так и в радиусе 1,5 м от него. Кроме того, грунт не разрыхлялся в центральной зоне вокруг уплотнителя.

Отбор образцов грунта режущим кольцом в промежутках между воронками оседания на глубину до 1,5 м от поверхности основания показал, что плотность скелета грунта составила 1,62 г/см³ при 90 %-й обеспеченности и 1,69 г/см³ при 50 %-й обеспеченности. Снижение плотности грунта при удалении от центра погружения уплотнителя не было отмечено. Учитывая, что по данным лабораторных исследований плотность сухого грунта в рыхлом сложении составляла в среднем $\rho_d^{\text{рыхл}} = 1,49$ г/см³, а в плотном — $\rho_d^{\text{плотн}} = 1,81$ г/см³, по зависимости (12) была определена относительная плотность I_D грунтов основания, равная, соответственно, 0,45 и 0,67. Подтверждением являются также полученные данные статического зондирования по оси погружения уплотнителя, приведенные на рис. 6.

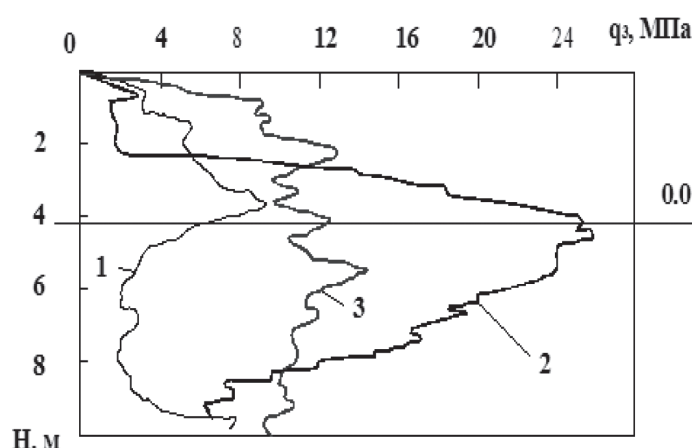


Рис. 6. Сравнительные данные статического зондирования основания: 1 — до уплотнения; 2, 3 — по оси виброуплотнителя после уплотнения виброустановкой конструкции ВНИИГС (2) и модернизированной конструкцией (3)

На рис. 6 видно, что до уплотнения сопротивлению внедрению острия зонда q_3 в надводной зоне составляло от 3,5 до 8 МПа, в подводной зоне — от 2,5 до 8 МПа. После уплотнения установкой конструкции ВНИИГС разброс данных по q_3 в целом и в надводной зоне составил от 1,5 до 25,5 МПа, в том числе в подводной зоне — от 6,5 до 25,5 МПа. Причем повышение q_3 в нижележащем слое основания не превышало 6,5 МПа, а на глубину до 2 м от поверхности основания произошло снижение q_3 с 3,5 – 5,5 МПа до 1,5 – 3 МПа.

По данным статического зондирования (рис. 6), после уплотнения модернизированной установкой сопротивление внедрению острия зонда q_3 повысилось в целом по всей глубине обрабатываемого слоя основания до 9 – 14 МПа.

Согласно существующим правилам на инженерно-геологические изыскания, в строительстве в России было определено, что данные значения q_3 соответствуют величинам относительной плотности грунтов основания в пределах $I_D = 0,48 – 0,76$. При этом было достигнуто значительное увеличение физико-механических характеристик грунтов оснований: модуля упругости E с 6 – 24 МПа до 27 – 42 МПа, угла внутреннего трения φ с $26 – 32^\circ$ до $32 – 34^\circ$. Таким образом, данные по I_D характеризуют пески мелкие и средние как средней плотности и плотные. Это обеспечивает устойчивость структуры песчаных грунтов оснований зданий и сооружений от большинства динамических, в том числе сейсмических воздействий [22].

Виброустановкой с модернизированным уплотнителем, погружаемой вибропогружателем ВПП-2, было произведено уплотнение верхового откоса дамбы в основании скоростной автодороги, уплотнение песчаного заполнителя балластов наплавных ворот судопропускных сооружений и других объектов на строительстве КЗС г. Санкт-Петербурга от наводнений. Объем внедрения на различных объектах только на строительстве КЗС составил не менее 1,0 млн куб. м уплотненного грунта. Следует отметить, что в ходе строительства КЗС впервые в строительной практике данная виброустановка была применена для уплотнения больших объемов (около 300 тыс. м³) грунта на одном объекте строительства.

Обсуждение (Discussion)

В последние годы основные результаты теоретических и экспериментальных исследований автора статьи были подтверждены независимыми исследованиями немецких специалистов [23]. Данные теоретические и экспериментальные исследования немецких специалистов основаны на уплотнении песчаных грунтов оснований на глубину до 10 м виброуплотнителем, созданным на базе тяжелого глубинного вибратора с подачей воды в зону уплотнения по системе труб, называемым специалистами «виброфлотом».

Следует отметить, что метод глубинного виброуплотнения песчаных грунтов на глубину 15 м с использованием пакета глубинных тяжелых вибраторов (пакета «Виброфлотов») давно известен российским гидротехникам по опыту его использования в разработках российских специалистов вибротехников на строительстве Асуанской плотины в Египте [24].

Выводы (Summary)

1. Повышение эксплуатационной безопасности и надежности портовых гидротехнических сооружений в процессе разжижения песчаных грунтов, как правило, используемых для образования новых и расширения существующих территорий, в том числе песчаных насыпок городских и портовых набережных, может быть обеспечено их уплотнением.

2. В настоящее время в России разработаны принципиально новые способы уплотнения грунтов оснований, позволяющие наряду с достижением большей глубины уплотнения обеспечить лучшую равномерность уплотнения грунта по глубине уплотняемой толщи.

3. Российская виброустановка продольного вибрирования с пространственным уплотнителем в виде «виброёлочки» широко применялась для уплотнения песчаных грунтов оснований, как водонасыщенных или маловлажных, так и их сочетания. Как показал анализ проведенных исследований, данная виброустановка обладает недостатками, которые особенно проявились при опытных испытаниях виброустановки конструкции ВНИИГС по уплотнению мощного девятиметрового слоя грунта (5 м водонасыщенного грунта в подводной зоне, перекрытого четырехметровым слоем маловлажных грунтов) тела песчаной дамбы.

4. Недостатки известной виброустановки могут быть исключены или существенно снижены путем применения уплотнителя с размещением радиальных элементов на заданной высоте, в нижней его части.

5. Теоретические исследования, проведенные на разработанной расчетной модели «вибропогружатель – уплотнитель – грунт основания», показали, что данное усовершенствование позволяет не менее чем в 1,5 – 2 раза увеличить глубину уплотнения основания, обеспечив достижение заданных значений плотности грунта основания $I_D \geq 0,6$. При применении модернизированного виброуплотнителя можно уменьшить разницу значений пористости по глубине уплотняемого основания до 0,01 – 0,02 и тем самым значительно улучшить равномерность уплотнения грунта в пределах заданной глубины.

6. Проведенные полевые испытания и опытное уплотнение в производственных условиях подтвердили, что данное решение позволяет не только обеспечить более легкое внедрение уплотнителя в грунт основания и его виброизвлечение, но и сохранить уплотняющую способность уплотнителя и улучшить равномерность уплотнения грунта основания по всей проектной глубине уплотнения. При применении модернизированного виброуплотнителя, по данным статического зондирования и отбора проб грунта, относительная плотность сложения грунта основания I_D изменялась от 0,5 до 0,8 по всей глубине и в радиусе эффективного действия виброустановки с модернизированным уплотнителем. При этом было достигнуто значительное увеличение физико-механических характеристик мелких и средних грунтов оснований: до значений модуля упругости E в пределах 30 – 40 МПа и угла внутреннего трения $\varphi = 32 - 34^\circ$.

7. Рекомендуются использовать вибропогружатель заводской марки В-402 с усовершенствованным уплотнителем при толщине слоя уплотнения 3 – 12 м.

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, д-ру физ.-мат. наук, проф., зав. лаб. вибрационной механики Института проблем машиноведения Российской Академии наук и НПК

«МеханоБрТехника» И. И. Блехману за его помощь при разработке автором теоретической модели системы «вибропогружатель – уплотнитель – грунт основания» для воздействия виброуплотнителя на грунт основания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Евтушенко Г. Н. Северные порты России / Г. Н. Евтушенко, М. А. Колосов, А. В. Силян, Р. М. Набут. — СПб.: Гидрометеиздат, 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, В. В. Аристархов, С. Н. Левачев. — 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 Y International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. — Paris, 1961. — Vol. 1. — Pp. 182–186.
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. Monograph / H. B. Seed, I. M. Idriss. — USA, Oakland, C.A.: Earthquake Engineering Research Institute, 1982. — 320 p.
8. Idriss I. M. Soil liquefaction during earthquakes / I. M. Idriss, R. W. Boulanger. — USA, California: EERI, 2008. — 240 p.
9. 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.
10. Ishihara K. Soil Behaviour in Earthquake Geotechnic. Monograph / K. Ishihara. — USA, Oxford: Clarendon Press, 2006. — 384 p.
11. Towhata I. On ageing of liquefaction resistance of sand / I. Towhata, S. Goto, Y. Taguchi, T. Hayashida, Y. Shintakui, Y. Hamada // Japanese Geotechnical Society Special Publication. — 2015. — Vol. 2. — Is. 21. — Pp. 800–805. DOI: 10.3208/jgssp.JPN-072.
12. Kokusho T. Energy-based liquefaction potential compared with stress-based evaluation / T. Kokusho // Sixth International Geotechnical Symposium on Disaster Mitigation in Special Geoenvironmental Conditions, IGS-Chennai, January 21-23, 2015. — IIT Madras, Chennai, India, 2015. — Pp. 9–18.
13. Минаев О. П. Разработка динамических методов глубинного уплотнения слабосвязанных грунтов оснований / О. П. Минаев // Основания, фундаменты и механика грунтов. — 2013. — № 6. — С. 21–23.
14. Зубков В. М. Способ глубинного уплотнения песчаных оснований / В. М. Зубков, Е. Д. Ковалевский, В. М. Анисимов // Основания, фундаменты и механика грунтов. — 1983. — № 2. — С. 6–7.
15. Савинов О. А. Вибрационный метод погружения свай и его применение в строительстве / О. А. Савинов, А. Я. Лускин. — Л.; М.: Госстройиздат, 1960. — 251 с.
16. Цейтлин М. Г. Вибрационная техника и технология в свайных и буровых работах / М. Г. Цейтлин, В. В. Верстов, Г. Г. Азбель. — Л.: Стройиздат, 1987. — 262 с.
17. Минаев О. П. Развитие виброметода уплотнения грунтов в строительстве / О. П. Минаев // Основания, фундаменты и механика грунтов. — 2011. — № 4. — С. 39–42.
18. Пат. 2135690 Российская Федерация, МПК E02D 3/054. Способ глубинного виброуплотнения песчаных грунтов / О. П. Минаев, Ю. К. Севенард, Е. М. Перлей, А. И. Соснин; заяв. и патентообл. ОАО «Всероссийский научно-исследовательский институт гидротехники им. Б. Е. Веденеева». — № 98105542/03; заявл. 13.03.1998; опублик. 27.08.1999.
19. Minaev O. P. Russian methods and equipment for spatial vibrocompaction foundations and structures / O. P. Minaev // Japanese Geotechnical Society Special Publication. — 2015. — Vol. 2. — Is. 80. — Pp. 2747–2750. DOI: 10.3208/jgssp.TC305-11.

20. Вибрация в технике: справ.: в 6 т. / Ред. совет: В. Н. Челомей (пред.). — М.: Машиностроение, 1978 – 1981. — Т. 4: Вибрационные процессы и машины / под ред. Э. Э. Лавендела. — 509 с.
21. Блехман И. И. Теория вибрационных процессов и устройств. Вибрационная механика и вибрационная техника / И. И. Блехман. — СПб.: ИД «Руда и металлы», 2013. — 640 с.
22. Ставницер Л. Р. Сейсмостойкость оснований и фундаментов: монография / Л. Р. Ставницер. — М.: Издательство Ассоциации строительных вузов, 2010. — 448 с.
23. Grabe J. Simulation of ground improvement using deep vibration compaction / J. Grabe, E. Heins, T. Hamann // Sixth International Geotechnical Symposium on Disaster Mitigation in Special Geoenvironmental Conditions, IGS-Chennai, January 21-23, 2015. — IIT Madras, Chennai, India, 2015. — Pp. 281–284.
24. Радченко Г. А. Уплотнение песков Асуанской плотины глубинными вибраторами / Г. А. Радченко // Тр. ЛПИ. — Л.: Ленинградский политехнический ин-т, 1959. — С. 12–21.

REFERENCES

1. Evtushenko, G.N., M.A. Kolosov, A.V. Silin, and R.M. Nabut. *Severnye porty Rossii*. SPb.: Gidrometeoizdat, 2006.
2. Budin, A.Ya. *Gorodskie i portovye naberezhnye*. SPb.: Izd-vo «Politekhnika», 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., V.V. Aristarkhov, and S.N. Levachev. *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 Y International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*. Vol. 1. Paris, 1961. 182–186.
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. Monograph*. USA, Oakland, C.A.: Earthquake Engineering Research Institute, 1982.
8. Idriss, I.M., and R.W. Boulanger. *Soil liquefaction during earthquakes*. USA, California: EERI, 2008.
9. 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.
10. Ishihara, K. *Soil Behaviour in Earthquake Geotechnic. Monograph*. USA, Oxford: Clarendon Press, 2006.
11. Towhata, Ikuo, Shigeru Goto, Yuichi Taguchi, Toshihiko Hayashida, Yuki Shintaku, and Yuki Hamada. “On ageing of liquefaction resistance of sand.” *Japanese Geotechnical Society Special Publication 2.21* (2015): 800–805. DOI: 10.3208/jgssp.JPN-072.
12. Kokusho, T. “Energy-based liquefaction potential compared with stress-based evaluation.” *Sixth International Geotechnical Symposium on Disaster Mitigation in Special Geoenvironmental Conditions, IGS-Chennai, January 21-23, 2015*. IIT Madras, Chennai, India, 2015. 9–18.
13. Minaev, O.P. “Development of dynamic methods for deep compaction of slightly cohesive bed soils.” *Soil Mechanics and Foundation Engineering* 6 (2013): 21–23.
14. Zubkov, V.M., E.D. Kovalevskii, and V.M. Anisimov. “Sposob glubinnogo uplotneniya peschanykh osnovanii.” *Soil Mechanics and Foundation Engineering* 2 (1983): 6–7.
15. Savinov, O.A., and A.Ya. Luskin. *Vibratsionnyi metod pogruzheniya svai i ego primeneniye v stroitel'stve*. L.; M.: Gosstroizdat, 1960.
16. Tseitlin, M.G., V.V. Verstov, and G.G. Azbel'. *Vibratsionnaya tekhnika i tekhnologiya v svaynykh i burovnykh rabotakh*. L.: Stroiizdat, 1987.
17. Minaev, O.P. “Razvitie vibrometoda uplotneniya gruntov v stroitel'stve.” *Soil Mechanics and Foundation Engineering* 4 (2011): 39–42.
18. Minaev, O.P., Yu.K. Sevenard, E.M. Perlei, and A.I. Sosnin. RU 2 135 690 C1, IPC E 02 D 3/054. Sposob glubinnogo vibrouplotneniya peschanykh gruntov. Russian Federation, assignee. Publ. 27 Aug. 1999.
19. 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
20. Chelomei, V.N. ed. *Vibratsiya v tekhnike: sprav.* Vol. 4. M.: Mashinostroenie, 1978 – 1981.

21. Blekhman, I.I. *Teoriya vibratsionnykh protsessov i ustroystv. Vibratsionnaya mekhanika i vibratsionnaya tekhnika*. SPb.: Izdatel'skii Dom «Ruda i metally», 2013.
22. Stavnitsker, L.R. *Ceismostoikost' osnovanii i fundamentov: monografiya*. M: Izda-tel'stvo Assotsiatsii Stroitel'nykh vuzov, 2010.
23. Grabe, J., E. Heins, and T. Hamann. "Simulation of ground improvement using deep vibration compaction." *Sixth International Geotechnical Symposium on Disaster Mitigation in Special Geoenvironmental Conditions, IGS-Chennai, January 21-23, 2015*. IIT Madras, Chennai, India, 2015. 281–284.
24. Radchenko, G.A. "Uplotnenie peskov Asuanskoi plotiny glubinnymi vibratorami." *Tr. LPI*. L.: Leningradskii politekhnicheskii in-t, 1959: 12–21.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

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

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Minaev, Oleg P. —
PhD, associate professor
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: minaev.op@bk.ru,
kaf_port@gumrf.ru

Статья поступила в редакцию 15 января 2018 г.
Received: January 15, 2018.