



DOI 10.5862/JEST.214.9
УДК 624.138.22

О.П. Минаев

МЕТОД УПЛОТНЕНИЯ ОСНОВАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ ВИБРОПОГРУЖАТЕЛЕМ ДЛЯ ШПУНТА В ГИДРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОМ СТРОИТЕЛЬСТВЕ

О.П. Минаев

METHOD OF COMPACTION OF FOUNDATIONS AND STRUCTURES VIBRATORY DEVICE FOR DIP TONGUE IN HYDROPOWER CONSTRUCTION

Вибропогружатель и разработанный на его основе российский метод уплотнения оснований установкой продольного вибрирования с пространственным уплотнителем в виде «виброелочки» широко применяется во всем мире для погружения шпунта и уплотнения песчаных грунтов оснований, как водонасыщенных или маловлажных, так и их сочетания. В статье приведены результаты теоретического обоснования с использованием разработанной расчетной модели и полевых испытаний метода глубинного виброуплотнения оснований, показывающие его недостатки, которые наиболее ярко проявились при уплотнении мощной толщи песчаных оснований (9 м и более). 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 при работе с надежным и экономичным вибропогружателем.

ВИБРОПОГРУЖАТЕЛЬ; ШПУНТ; ВИБРОПОГРУЖЕНИЕ (ВИБРОИЗВЛЕЧЕНИЕ); ВИБРАЦИОННАЯ УСТАНОВКА; ВИБРАЦИОННЫЙ МЕТОД УПЛОТНЕНИЯ; ГЛУБИННОЕ УПЛОТНЕНИЕ; РАЗЖИЖЕНИЕ ГРУНТА; МОДЕРНИЗИРОВАННЫЙ УПЛОТНИТЕЛЬ; НАДЕЖНОСТЬ; ЭКОНОМИЧНОСТЬ.

Vibrator and developed on the basis of it the Russian method of the bases vibratory compaction by means of longitudinal vibration with spatial seal in the form of “vibroelochki” is widely used throughout the world to dive tongue and vibro sandy soils bases such as both saturated or slightly wet, and their combinations. The paper presents the results of a theoretical study on the developed simulation model and field tests of the method of deep vibro grounds showing its shortcomings. These disadvantages have been most clearly manifested when thick layer of sandy grounds (9m and more) was compacted. In this paper we show that a certain vibratory disadvantages can be eliminated or significantly reduced by the use of vibratory compactors with the placement of the radial elements at a given height in the bottom of the stem seal. This improves the vibratory specifications when working with reliable and economical vibrator.

VIBRATORY PILE DRIVER, THE PILE. VIBROPHONE (VIBROISOLATING), VIBRATION DEVICE, THE VIBRATION METHOD OF COMPACTION, DEEP COMPACTION, LIQUEFACTION OF SOIL, UPGRADED SEAL, RELIABILITY, EFFICIENCY

Введение

Вибропогружатель с подрессоренной пригрузкой (ВПП-2) производственной марки В-402 (В-402ВЧ) был впервые разработан российскими учеными профессорами О.А. Савиновым и А.Я. Лускиным еще в 1950 году. Он состоит из двух частей: вибрирующей части и пригрузочной

массы, изолированной от вибрации. В вибрирующую часть входит вибратор и наголовник, а в изолированную от вибрации — электродвигатель и пригрузочные плиты. При этом обе части соединяются системой пружин (рис. 1.).

Данный вибропогружатель с электроприводом широко используется в строительстве во многих 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. Несмотря на высокую конкуренцию с современными мощными вибропогружателями с гидравлическим приводом в основном зарубежного производства он продолжает выпускаться на Охтинском заводе строительных машин в Санкт-Петербурге (Россия).

В 1959 году на базе вибропогружателя ВПП-2 был создан в России во ВНИИГС (Всесоюзный НИИ гидромеханизации, санитарно-технических и специальных строительных работ) пространственный уплотнитель продольного вибрирования, получивший в дальнейшем общепринятое краткое название «виброелочка», для глубинного уплотнения песчаных оснований.

Данный уплотнитель изготавливается из трубчатой штанги, которую с целью повышения производительности путем увеличения радиуса действия вдоль ее длины снабжают радиальными элементами для придания уплотнителю пространственной структуры.

Пространственная структура представляет собой многоярусную систему, напоминающую «елочку», содержащую в каждом ярусе по четыре крестообразно расположенных и приваренных к штанге пластинчатых элемента, имеющих в вертикальной плоскости форму трапеции, су-

жающейся 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 патрубком в верхней части для подачи под давлением воды в грунт основания.

Уплотнитель через фланец в верхней части трубчатой штанги жестко соединяется болтами с вибропогружателем.

Собранная вибрационная установка, включающая в себя вибропогружатель и уплотнитель, подвешивается на крюке крана.

Постановка задачи

Среди различных методов уплотнения грунтов целесообразно выделить российский виброметод глубинного уплотнения песчаных оснований. Обоснованию этого метода уплотнения и посвящена данная статья.

Процесс работы описанной вибрационной установки включает в себя погружение уплотнителя в грунт основания на заданную глубину и последующий его подъем. На всем промежутке времени погружения и подъема уплотнителя через сопло в нижнем конце штанги в грунт основания под давлением подается вода.

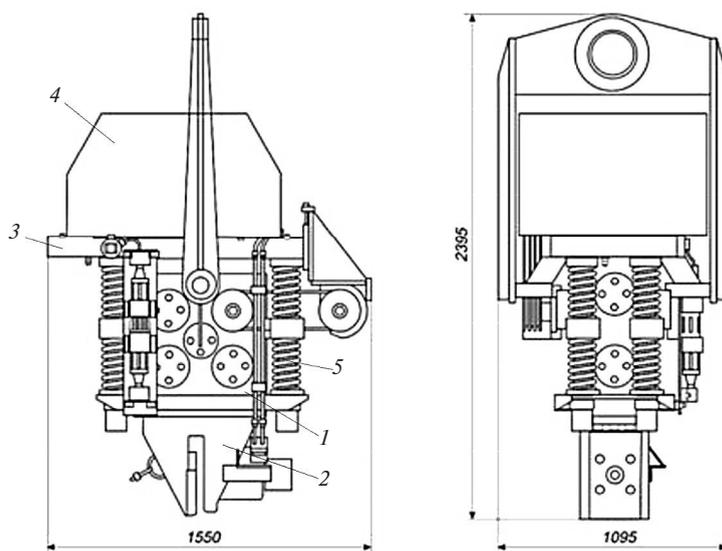


Рис. 1. Общий вид современной вариации конструкции вибропогружателя ВПП-2: 1 — вибратор; 2 — наголовник; 3 — пригрузочная плита; 4 — электродвигатель (под кожухом); 5 — пружины

При этом динамическое воздействие вибропогружателя на песчаную водонасыщенную среду распространяется на весь объем массива грунта в радиусе действия уплотнителя на глубине его погружения. Песок при вибрации уплотняется вследствие более компактной переукладки песка после разжижения.

Уплотнитель типа «виброелочка» 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 оснований виброустановкой конструкции ВНИИГС нашло самое широкое применение как в отечественной, так и зарубежной практике строительства [1].

В дальнейшем, в 70–80 годы прошлого столетия, совершенствование метода глубинного уплотнения грунтов оснований данной виброустановкой велось во ВНИИГС главным образом по пути разработки более мощного вибропогружателя. В этом институте был создан сравнительно более тяжелый вибропогружатель ВШ-1, работающий как в вибрационном, так и в ударно-вибрационном режиме.

Ввиду отсутствия теоретического обоснования уплотнения грунтов такой виброустановкой все разработки ВНИИГС базировались на результатах опытных испытаний, которые сопровождались полевыми и лабораторными определениями физико-механических характеристик грунтов оснований на лабораторной базе данного научно-исследовательского института.

Кроме того, был актуальным поиск других направлений совершенствования данного метода уплотнения (в частности, путем принципиального совершенствования конструкции виброуплотнителя), облегчающих работу вибропогружателя и повышающих его надежность, а также увеличивающих глубину уплотнения и улучшающих процесс уплотнения грунтов основания. Суть заключается в размещении пространственных элементов только в нижней части штанги уплотнителя на заданной высоте уплотнения основания [2–4].

Цель настоящей работы — разработка теоретической модели воздействия вибропогружателя на песчаные водонасыщенные грунты основания с помощью пространственного уплотнителя про-

дольного вибрирования, проведение сравнительных теоретических исследований и опытное подтверждение в производственных условиях эффективности уплотнения оснований виброуплотнителем модернизированной конструкции.

Теоретическое обоснование метода

В соответствии с исследованиями профессоров О.А. Савинова и И.И. Блехмана [5–12] наилучшее уплотнение для сыпучей среды имеет место при

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

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

Известно, 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, имея в виду, что

$$\delta \approx \sqrt{\frac{2\nu}{\omega}}, \quad (3)$$

где ν — кинематическая вязкость жидкой среды, запишем

$$A = A_0 e^{-x\sqrt{\frac{\omega}{2\nu}}}. \quad (4)$$

Считаем, что формулы (2) и (3) справедливы и для рассматриваемой уплотняемой водонасыщенной песчаной среды, если под ν и δ понимать экспериментально определяемые коэффициенты.

Пусть на расстоянии $x = r$ от источника колебаний при заданной ω имеет место критическая, т. е. минимально допустимая для полного разжижения грунта в уплотняемой зоне, амплитуда колебаний $A = A_r$, так что

$$A_r = A_0 e^{-\frac{r}{\delta}}. \quad (5)$$

Из (5) имеем

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

откуда определим

$$\delta = -\frac{r}{\ln \frac{A_r}{A_0}} = \frac{r}{\ln \frac{A_0}{A_r}}. \quad (7)$$

Известно, что

$$A_0 \approx \frac{P_0}{m\omega^2} = \frac{P_0}{m(2\pi f)^2}, \quad (8)$$

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

С учетом динамического сопротивления $P_{\text{дин}}$ погружению вибрирующего элемента уплотнителя приближенно запишем

$$A_0 = \frac{P_0 - P_{\text{дин}}}{m\omega^2} = \frac{P_0 - (P_{\text{тр}}^{\text{дин}} + P_{\text{лоб}}^{\text{дин}})}{(m_{\text{в}} + m_{\text{упл}})(2\pi f)^2}, \quad (9)$$

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

Как известно из исследований профессоров М.Г. Цейтлина и В.В. Верстова и из исследований автора статьи, 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 сопротив-

ления погружению свай. 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 исходной ω_0 запишем

$$r = \delta^* \sqrt{\frac{\omega_0}{\omega}} \ln \frac{A_{\text{nhc}}}{A_r}, \quad (10)$$

где A_{nhc} — амплитуда колебаний уплотнителя с учетом сил динамического бокового и лобового сопротивлений его погружению в грунты основания на глубине погружения, равной $h_{\text{сл}}$. Таким образом с увеличением ω эффективное расстояние от источника колебаний убывает.

Необходимые для расчетов технические характеристики вибропогружателя В-402 соответствует приведенным в таблице, а для виброустановки ВУУП-6 примем согласно [1].

Используя зависимости (1)–(10), вычислим исходные амплитуды и зону уплотнения по глубине погружения уплотнителя конструкции ВНИИГС вибропогружателем ВПП-2 в зависи-

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

Показатель	Значения показателей для разных марок вибропогружателей	
	В-402 В-402ВЧ (ВПП-2)	ВШ-1 ВШ-1М
Номинальная мощность приводного электродвигателя, кВт	55	44 (22×2)
Статический момент массы дебалансов, кг·см	1200,600	2500
Частота колебаний, Гц	24,33	13,16,20
Максимальная амплитуда вынуждающей силы, кН	270,256	400
Усилие полного сжатия пружин амортизатора, кН	120	290
Тип наголовника	Клиновой, гидравлический	Клиновой, гидравлический
Масса вибрирующей (ударной) части, кг	940	3000
Общая масса, кг	2710	5000
Габаритные размеры, мм:		
в плане	1550×1 095	1280×1250
высота	1 980	2740

Примечание. ВПП-2, В 402, В 402ВЧ — вибрационные машины; ВШ-1 и ВШ-1М — вибрационные машины с перенастройкой при необходимости на ударно-вибрационный режим

мости от значений сопротивления трению 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 «виброелочки» увеличивается с 3 до 4,06 м при приближении уплотнителя к поверхности грунтового основания.

Проведены аналогичные расчеты для виброустановки с модернизированным уплотнителем при сокращении количества пространственных элементов уплотнителя в три раза и построена кривая зоны уплотнения для модернизированного виброуплотнителя (см. рис. 2).

При увеличении глубины уплотнения в два раза (до 12 м) проведены расчеты для модернизированного уплотнителя при высоте размещения пространственных элементов в нижней части штанги уплотнителя, также равной 1/3 глубины уплотнения (4 м).

Полученные данные представлены кривой на рис. 2. Видно, что глубина уплотнения грунта увеличивается с 6 м у виброустановки конструкции ВНИИГС до 9,53 м в случае использования модернизированного уплотнителя при сохранении размеров зоны уплотнения (равна 3 м для обоих типов уплотнителей) и прочих равных параметрах.

Кроме того, 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. 2), можно считать вполне приемлемой для эффективного применения виброустановки на этой глубине уплотнения грунтов.

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

Для проведения сравнительных исследований достигаемой плотности грунтов основания в качестве основополагающего прием график времени воздействия виброустановки конструкции ВНИИГС на грунты основания, а также по-

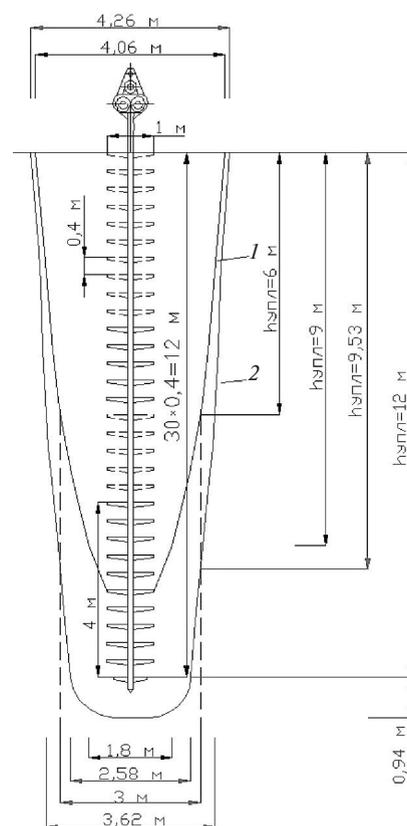


Рис. 2. Зона уплотнения водонасыщенных песчаных грунтов основания средней крупности до глубины 12 м виброустановкой модернизированной конструкции (1) и уменьшение зоны уплотнения грунта и глубины погружения уплотнителя конструкции ВНИИГС (2)

строенные на его основе и приведенные на рис. 3 временные графики для модернизированной виброустановки при размещении пространственных элементов в нижней части штанги уплотнителя на высоте, равной 1/2 и 1/3 глубины уплотнения.

Результаты испытания

На строительстве комплекса защитных сооружений (КЗС) Санкт-Петербурга от наводнений первоначально была апробирована виброустановка конструкции ВНИИГС, включающая в себя 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.

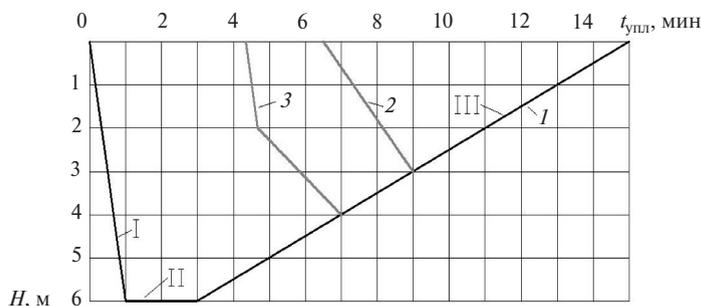


Рис. 3. Графики времени вибродействия на грунты основания: 1 — виброустановкой конструкции ВНИИГС; 2 и 3 — модернизированной виброустановкой при размещении пространственных элементов в нижней части штанги уплотнителя на высоте, соответственно равной 1/2 и 1/3 глубины уплотнения; I — стадия погружения уплотнителя; II — стадия выдержки на заданной глубине уплотнения; III — стадия подъема уплотнителя

С учетом этих ребер диаметр пространственно-уплотнителя составлял 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.

В результате экспериментальных исследований было установлено, что при погружении—извлечении уплотнителя в грунты песчаного основания вокруг него образуются 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 2 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 происходил размыв — разрыхле-

ние поверхностного слоя песка на глубину 1,5–2 м и более напором воды при вытаскивании уплотнителя. Попытка же прекращения подачи воды при вытаскивании уплотнителя из грунтов песчаного основания приводила к его заклиниванию в грунте.

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.

Сравнительные натурные исследования виброустановки конструкции ВНИИГС и модернизированной конструкции виброуплотнителя производились при видоизменении конструкции уплотнителя, которая заключалась в срезке верхних горизонтальных ребер и сохранении их только на участке 3,5–4,5 м в нижней части штанги. Согласно теоретическим исследованиям такое изменение конструкции должно облегчить работу вибропогружателя за счет потерь на внедрение и вибрирование горизонтальных ребер уплотнителя в поверхностном слое увлажненного грунта, оставшиеся же ребра должны были обеспечить сохранение уплотняющей способности в области подачи воды.

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 части, так и в радиусе 1,5 м. 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 % обеспеченности. Снижение плотности грунта при удалении от центра погружения уплотнителя не было отмечено.

Сказанное наиболее наглядно подтверждает сравнение данных статического зондирования по оси погружения уплотнителя, приведенных на рис. 3.

Видно (см. рис. 4), что до уплотнения сопротивление внедрению острия зонда q_3 в надводной зоне составляло от 3,5 до 8 МПа, в подводной зоне — 2,5–8 МПа. После уплотнения установкой конструкции ВНИИГС разброс данных по q_3 в целом и в надводной зоне составлял 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 глубине до 2 м от поверхности основания произошло снижение q_3 с 3,5–5,5 до 1,5–3 МПа.

По данным статического зондирования (см. рис. 4) после уплотнения модернизированной установкой сопротивление внедрению острия

зонда q_3 повысилось в целом по всей глубине обрабатываемого слоя основания до 9–14 МПа. Полученные данные по q_3 характеризуют пески мелкие и средние как средней плотности и плотные [13]. Это обеспечивает устойчивости структуры песчаных грунтов оснований зданий и сооружений от большинства динамических, в том числе сейсмических воздействий [14–23].

Виброустановкой с модернизированным уплотнителем и вибропогружателем ВПП-2 было произведено уплотнение верхнего откоса дамбы в основании скоростной автодороги, песчаного заполнителя балластов наплавных ворот судопропускных сооружений и других объектов на строительстве комплекса защитных сооружений 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 на строительстве КЗС впервые в строительной практике данная виброустановка была использована для уплотнения больших объемов (около 300 тыс. куб. м) грунта на одном объекте строительства.

Выводы

Вибропогружатель и российский метод уплотнения оснований виброустановкой продольного вибрирования с пространственным уплотнителем в виде «виброелочки» широко применяется для уплотнения песчаных грунтов оснований, как водонасыщенных, так и мало-влажных, а также и их сочетания. Как показал анализ проведенных исследований, данная

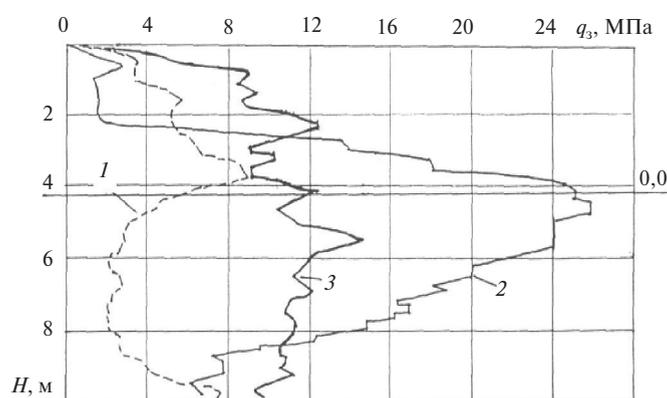


Рис. 4. Сравнительные данные статического зондирования основания до уплотнения (1) и после уплотнения виброустановкой конструкции ВНИИГС (2) и модернизированной установкой (3)

виброустановка обладает недостатками, которые особенно проявились при 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.

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

Теоретические исследования, проведенные на разработанной расчетной модели «вибропогружатель — уплотнитель — грунт основания», показали, что предложенное усовершенствование позволяет не менее чем в 1,5–2 раза увеличить глубину уплотнения основания и повысить равномерность уплотнения грунта по глубине основания одновременно при обеспечении заданных значений плотности.

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, сохранив его уплотняющую способ-

ность, но и улучшить равномерность уплотнения грунта основания по всей проектной глубине.

Представляется, что разработанная расчетная модель может быть также использована для оценки глубины погружения шпунта и расчета величин вибродинамического воздействия на здания и сооружения при вибрационном методе глубинного уплотнения грунтов близлежащих оснований и погружении шпунта при устройстве ограждающих котлованов и траншей.

Для погружения уплотнителя следует преимущественно использовать вибропогружатель заводской марки В-402 ввиду сравнительно небольшой его стоимости и высокой надежности при работе с усовершенствованным уплотнителем при толщине подлежащего уплотнению слоя от 3 до 12 м.

Современное состояние строительной практики позволяет рекомендовать вибропогружатель В-402 как для вибропогружения (на глубину 12–15 м) и виброизвлечения металлического шпунта в водонасыщенных песчаных и слабых глинистых грунтах при устройстве ограждающих котлованов и траншей, так и для уплотнения песчаных грунтов оснований и сооружений в гидроэнергетическом строительстве в различных регионах мира.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Zubrov V.M., Kovalevcki E.D., Anicimov V.M. Method of deep compaction of sandy foundations // Soil Mechanics and Foundation Engineering. 1983. Vol. 18. Iss. 2. P. 6–7.
2. Minaev O.P. Modernized vibratory device for deep compaction of sandy soils // Soil Mechanics and Foundation Engineering. 2003. 40 Vol. 40. Iss. 6. P. 220–222.
3. Minaev O.P. Development of vibratory method for soil compaction during construction (2011) Soil Mechanics and Foundation Engineering. Vol. 48. Iss. 5. P. 190–195.
4. Minaev O.P. Development of Dynamic Methods for Deep Compaction of Slightly Cohesive Bed Soils Soil Mechanics and Foundation Engineering. 2014. Vol. 50. Iss. 6. P. 251–254.
5. Uzdin A.M., Belash T.A., Blekhman I.I. On the heritage of Professor O A. Savinov Soil Mechanics and Foundation Engineering. 2011. Vol. 48. Iss. 5. P. 182–189.
6. Blekhman I.I. Comments by the book's editor on the review of «Selected topics in vibrational mechanics» // Sound and Vibration. 2009 Vol. 320. Iss. 1–2. P. 469–470.
7. Indeitsev D., Mochalova Y., Blekhman I. Generation and motion of gas–fluid mixture in vibrating vessel // Proc of 17th International Congress on Sound and Vibration (ICSV17). Cairo, Egypt. 2010. P. 1983–1990.
8. Golovanevskiy V.A., Arsenteyev V.A., Blekhman I.I., Vasilkov V.B., Azbel Y.I., Yakimova K.S. Vibration-induced phenomena in bulk granular materials (2011) Mineral Processing. Vol. 100. Iss. 34. P. 79–85.
9. Blekhman I.I., Blekhman L.I., Sorokin V.S., Vasilkov V.B., Yakimova K.S. Surface and volumetric effects in a fluid subjected to high-frequency vibration Proc. of the Institution of Mechanical Engineers, Part C, Journal of Mechanical Engineering Science. London. 2012. Vol. 226. Iss. 8. P. 2028–2043.
10. Sorokin V.S., Blekhman I.I., Vasilkov V.B. Motion of a gas bubble in fluid under vibration // Nonlinear Dynamics. 2012. Vol. 67. Iss. 1. P. 147–158.
11. Blekhman I.I., Blekhman L.I., Sorokin V.S., Vaisberg L.A., Vasilkov V.B., Yakimova K.S. Motion of gas bubbles and rigid particles in vibrating fluid-filled volumes // Proc. of IUTAM Simp. «Waves in fluids: Effects of nonlinearity, rotation, stratification and dissipation». Moscow, 2013. Vol. 8. P. 43–50.
12. Blekhman I.I., Vasilkov V.B., Yaroshevich N.P. On Some Opportunities for Improving Vibration Machines



with Self-Synchronizing Inert Vibration Exciters // Machinery Manufacture and Reliability. 2013. Vol. 42 Iss. 3. P. 192–195.

13. **Minaev O.P.** Evaluation of the quality of compacting water-saturated sands by sounding // Soil Mechanics and Foundation Engineering. 1994. Vol. 31 Iss. 4. P. 141–144.

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

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

16. **Seed H.B., Idriss I.M.** Ground motions and soil liquefaction during earthquakes Monograph. USA, Oakland. 1982. C.A.: Earthquake Engineering Research Institute. 320 p.

17. **Seed H.B., Idriss I.M.** Simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential // Soil Mechanics and Foundation Division. 1971. Vol. 97 (SM9). P. 1249–1273.

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

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

20. **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.

21. **Tsukamoto Y., Ishihara K.** Analyses on settlement of soil deposits following liquefaction during earthquake // Soils and Foundations. 2010. Vol. 50. Iss. 3. P. 399–441.

22. **Ilichev V.A., Stavnitser L.R., Shiskin V.Ya.** Reduction of foundation vibration after bed strengthening with cast-in-place sand // Soil Mechanics and Foundation Engineering. 1995. Vol. 32, No 3. P. 92–94.

23. **Stavnitser L.R.** Prediction of accumulation of seismic deformation of bases // Soil Mechanics and Foundation Engineering. 1992. Vol. 29 Iss. 6. P. 187–191.

REFERENCES

1. **Zubrov V.M., Kovalevski E.D., Anicimov V.M.** Method of deep compaction of sandy foundations. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 1983. Vol. 18. Iss. 2. P. 6–7.

2. **Minaev O.P.** Modernized vibratory device for deep compaction of sandy soils *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 2003. Vol. 40. Iss. 6. P. 220–222.

3. **Minaev O.P.** Development of vibratory method for soil compaction during construction. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 2011. Vol. 48. Iss. 5. P. 190–195.

4. **Minaev O.P.** Development of Dynamic Methods for Deep Compaction of Slightly Cohesive Bed Soils (2014) *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 50(6). P. 251–254.

5. **Uzdin A.M., Belash T.A., Blekhman I.I.** On the heritage of Professor O A. Savinov. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 2011. Vol. 48. Iss. 5. P. 182–189.

6. **Blekhman I.I.** Comments by the book's editor on the review of «Selected topics in vibrational mechanics». *Sound and Vibration*. 2009. Vol. 320. Iss. 1–2. P. 469–470.

7. **Indeitsev D., Mochalova Y., Blekhman I.** Generation and motion of gas-fluid mixture in vibrating vessel. *Proc of 17th International Congress on Sound and Vibration (ICSV17)*. Cairo, Egypt. 2010. P. 1983–1990.

8. **Golovanevskiy V.A., Arsenyev V.A., Blekhman I.I., Vasilkov V.B., Azbel, Y.I., Yakimova K.S.** Vibration-induced phenomena in bulk granular materials. *Mineral Processing*. 2011. Vol. 100. Iss. 34. P. 79–85.

9. **Blekhman I.I., Blekhman L.I., Sorokin V.S., Vasilkov V.B., Yakimova K.S.** Surface and volumetric effects in a fluid subjected to high-frequency vibration. *Proc.*

of the Institution of Mechanical Engineers, Part C, Journal of Mechanical Engineering Science. London. 2012. Vol. 226. Iss. 8. P. 2028–2043.

10. **Sorokin V.S., Blekhman I.I., Vasilkov V.B.** Motion of a gas bubble in fluid under vibration. *Nonlinear Dynamics*. 2012. Vol. 67. Iss. 1. P. 147–158.

11. **Blekhman I.I., Blekhman L.I., Sorokin V.S., Vaisberg L.A., Vasilkov V.B., Yakimova K.S.** Motion of gas bubbles and rigid particles in vibrating fluid-filled volumes. *Proc. of IUTAM Simp. «Waves in fluids: Effects of nonlinearity, rotation, stratification and dissipation»*. Moscow. 2013. Vol. 8. P. 43–50.

12. **Blekhman I.I., Vasilkov V.B., Yaroshevich N.P.** On some Opportunities for Improving Vibration Machines with Self-Synchronizing Inert Vibration Exciters. *Machinery Manufacture and Reliability*. 2013. Vol. 42. Iss. 3. P. 192–195.

13. **Minaev O.P.** Evaluation of the quality of compacting water-saturated sands by sounding. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 1994. Vol. 31. Iss. 4. P. 141–144.

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

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

16. **Seed H.B., Idriss I.M.** Ground motions and soil liquefaction during earthquakes: Monograph. USA, Oakland, 1982. C.A.: Earthquake Engineering Research Institute. 320 p.

17. **Seed H.B., Idriss I.M.** Simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential. *Soil Mechanics and Foundation Division*. 1971. № 97 (SM9). P. 1249–1273.

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

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

20. **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.

21. **Tsukamoto Y., Ishihara K.** Analyses on settlement of soil deposits following liquefaction during earthquake. *Soils and Foundations*. 2010. Vol. 50. Iss. 3. P. 399–441.

22. **Ilichev V.A., Stavnitser L.R., Shiskin V.Ya.** Reduction of foundation vibration after bed strengthening with cast-inplace sand. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 1995. Vol. 32, № 3. P. 92–94.

23. **Stavnitser L.R.** Prediction of accumulation of seismic deformation of bases. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 1992. Vol. 29. Iss. 6. P. 187–191.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

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

AUTHOR

MINAEV Oleg P. — Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University. 29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia. E-mail: minaev.op@bk.ru