

doi: 10.5862/MCE.50.4

## Эффективный метод взрывного уплотнения оснований гидротехнических сооружений

*К.т.н., докторант О.П. Минаев,**Санкт-Петербургский государственный политехнический университет*

**Аннотация.** При взрывном методе уплотнения известны два способа взрывания зарядов в каждой очереди: одновременный и последовательный. В данной статье приведены теоретическое обоснование, результаты полевых испытаний и опытного уплотнения в производственных условиях, доказывающие эффективность способа последовательного взрывания зарядов по сравнению с одновременным их взрыванием при площадочном уплотнении грунтов оснований.

В проведенных теоретических исследованиях показано, что при последовательном взрывании соседних зарядов с интервалом времени  $\Delta t$  меньшим, чем время уплотнения разжиженного слоя грунта основания  $t_{УП1}$  от взрыва предыдущего, происходит многократное разрушение структуры грунта и его консолидация в пределах уплотняемого основания.

Полученные результаты опытных испытаний показали возрастание величин относительной осадки для средних и максимальных осадок на площадке последовательного взрывания зарядов по сравнению с площадкой одновременного взрывания зарядов. Соответственно, сопротивление внедрению острия  $q_3$  статического зонда увеличилось до значений, свидетельствующих о плотном сложении песчаных оснований после уплотнения способом последовательного взрывания зарядов.

**Ключевые слова:** основания и сооружения; гидротехническое строительство; водонасыщенные песчаные грунты; взрывной метод уплотнения; способ последовательного взрывания зарядов; осадки; плотность.

### Введение

Взрывное уплотнение песчаных водонасыщенных грунтов оснований и сооружений в гидротехническом строительстве применяется давно. Еще в 1939–1940 гг. в США глубинными взрывами были уплотнены рыхлые водонасыщенные мелкие и средние пески в основании земляной плотины Франклин [1, 2]. В России опытное уплотнение влажных песчаных грунтов основания взрывным методом впервые было проведено Н.Н. Масловым и Н.А. Филимоновым при строительстве Верхне-Свирской ГЭС.

Первые опытные работы в природных условиях на водонасыщенных песках были выполнены П.Л. Ивановым под руководством В.А. Флорина при строительстве Волжской ГЭС. В дальнейшем такие работы проводились под руководством П.Л. Иванова на многочисленных объектах гидротехнического строительства в России и за рубежом [3–6], в частности в Польше [7–8].

Анализ примеров опытного и производственного уплотнения оснований и сооружений взрывами показывает следующее.

Уплотнению подвергались в основном мелкозернистые пески, влажные как в основании плотины (Волжская ГЭС), так и подводного намыва (Горьковская и Братская ГЭС), а также обладающие просадочными свойствами (Казахстан, Мангышлак). В то же время диапазон подверженных уплотнению грунтов достаточно широк – от супесей пылеватых песков (Ленинград, подводный намыв территории Васильевского острова), тонкозернистых песков (Капчагайская ГЭС) до каменной наброски и галечника (Новороссийск, основание мола и каменная постель стенки пирса). В большинстве случаев применялся способ глубинного взрыва зарядов. При этом максимальная глубина уплотнения достигала 9 м. Предоставленные данные о взрыве поверхностных зарядов позволяют констатировать, что глубина уплотнения основания составляла от 2,5 до 4 м. Подводные взрывы каменной наброски и галечника в основании мола Новороссийского порта позволяли обеспечить глубину уплотнения до 8 м, а каменной постели – 3 м при массе заряда 20 и 10 кг тротила соответственно.

В целом масса заряда не превышала 9 кг при глубинных взрывах и 20 кг при подводных и поверхностных взрывах. Глубина погружения зарядов в грунт основания и воду составляла от 2 до 12 м.

Расстояние между зарядами – от 4 до 15 м. Количество очередей взрывов – от 1 до 4. Суммарная осадка поверхности основания достигала 60–75 см, а относительная осадка 2–10 % и

Минаев О.П. Эффективный метод взрывного уплотнения оснований гидротехнических сооружений

даже 8–13 % в просадочных мелкозернистых песках. Относительная плотность песчаного грунта основания до взрывов в основном была равной 0,2–0,3 (0,4–0,5 во влажных грунтах основания плотины Волжской ГЭС), пористость 43–45 и 40 % каменной постели стенки пирса.

Общий расход взрывчатого вещества на 1 м<sup>3</sup> уплотненного грунта основания при глубинных взрывах составлял от 8 до 29 г, при поверхностных и подводных взрывах – от 100 до 400 г, на одну очередь взрывов – от 3 до 12 г и от 50 до 400 г соответственно.

В целом во всех случаях эффект уплотнения был значительным и позволял выполнить поставленную задачу по повышению плотности грунта основания и обеспечения динамической устойчивости его структуры.

Стоимость уплотнения взрывами 1 м<sup>3</sup> грунтов основания в зависимости от местных условий колебалась от 0,1 до 0,3 руб. (в ценах 1984 г.). Производительность уплотнения достигала 5000–10000 м<sup>3</sup> уплотненного грунта в смену (работа бригады при одном агрегате для погружения зарядов).

## 1. Постановка задачи

Острая необходимость применения взрывного метода уплотнения песчаных грунтов при строительстве комплекса защитных сооружений Санкт-Петербурга (КЗС) от наводнений возникла в южном створе комплекса при возведении водопропускных сооружений В-1 и В-2 на слабых глинистых грунтах основания текучей и текуче-пластичной консистенции.

Согласно проекту, разработанному институтом «Ленгидропроект», предусматривалось устройство подпорных стенок и мостовых опор сооружений В-1 и В-2 на буронабивных сваях и наклонных забивных сваях (для восприятия наклонных нагрузок), а других основных частей сооружения, таких как мостовая рисберма, фундаментная плита, рисберма со стороны Финского залива и Невской губы, – на подготовленном основании. Это потребовало выемки слабых глинистых грунтов и устройства взамен их песчаной подушки, распределяющей нагрузку по всему контуру сооружения.

В дальнейшем взрывной метод использовался для уплотнения песчаных грунтов в подводной зоне тела дамб на различных объектах КЗС.

При взрывном методе уплотнения известны два способа взрывания зарядов в каждой очереди: одновременный и последовательный.

По рекомендациям П.Л. Иванова [6] на начальном этапе внедрения взрывного метода на строительстве КЗС в 1987 году предпочтение отдавалось способу одновременного взрывания зарядов в каждой очереди. Этот способ заключался в монтаже взрывной сети, соединяющей все заряды данной очереди детонирующим шнуром и образующую в плане замкнутый контур, и их единовременный взрыв. В данном случае взрывание зарядов следующей очереди должно производиться только после полной стабилизации осадок основания от взрывания зарядов предыдущей очереди. При этом достигаемая степень уплотнения определяется только количеством очередей взрывов на данном основании.

Основную трудоемкость при осуществлении взрывного метода уплотнения представляет процесс погружения зарядов, она пропорционально усиливается с увеличением количества очередей взрывов. Кроме того, стоимость детонирующего шнура достаточно высока, что увеличивает себестоимость взрывного метода уплотнения.

Следует также отметить, что при уплотнении основания способом одновременного взрывания зарядов на участке примыкания дамбы №8 к судопропускному сооружению №2 не удавалось достигнуть проектной степени уплотнения песков даже после 6-й очереди.

В связи с существующими недостатками способа одновременного взрывания зарядов автором было предложено вместо него использовать последовательный способ. Проведенные исследования, основные результаты которых изложены в данной статье, позволили впервые доказать эффективность способа последовательного взрывания зарядов по сравнению со способом одновременного взрывания зарядов при площадочном уплотнении грунтов оснований [9]. Данное утверждение подтверждено теоретическим обоснованием, полевыми испытаниями и широкомасштабным применением этого способа в практике строительства.

## 2. Теоретическое обоснование

Теоретические исследования производились автором для обоснования преимущества способа последовательного взрывания зарядов, а также с целью определения оптимального временного интервала запаздывания  $\Delta t$  при последовательном взрывании зарядов. При этом должна быть ликвидирована неуплотненная зона в промежутках между смежными зарядами и достигнуто повторное воздействие взрыва на ранее уплотненный от взрыва предыдущего заряда слой.

В соответствии с [6] глубина заложения заряда в слое основания  $h$  из условия камуфлетности энергии взрыва определяется по зависимости

$$h = 3 \sqrt{\frac{C}{0,055}}, \quad (1)$$

где  $C$  – масса заряда взрывчатого вещества (ВВ), кг.

В этом случае по экспериментальным данным П.Л. Иванова [6] зависимость между расчетной глубиной заложения заряда в слое песчаного водонасыщенного грунта и глубиной уплотнения грунтов основания определяется соотношением

$$h_{уп} = \frac{h}{0,67}. \quad (2)$$

Для характеристики изменения напряженного состояния скелета грунта основания при действии ударной волны может использоваться соотношение

$$\Delta = \frac{\sigma(p_{max})}{\sigma(\gamma_{zp})}, \quad (3)$$

где  $\sigma(p_{max})$  – максимальные давления ударной волны, передающиеся на скелет грунта основания;  $\sigma(\gamma_{zp})$  – вертикальные напряжения в скелете грунта основания.

Вертикальные напряжения в скелете грунта основания на глубине  $Z$  с учетом взвешивающего действия воды определяются как

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

где  $\gamma_s$ ,  $\gamma_w$  – удельный вес частиц грунта и воды;  $n$  – пористость грунта.

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

$$\sigma(p_{max}) = \frac{(\beta_T m + \beta_B n) p_{max}}{(\beta_T m + \beta_B n + \beta_{СК})}, \quad (5)$$

где  $m = 1-n$ ;  $\beta_T$ ,  $\beta_B$ ,  $\beta_{СК}$  – соответственно коэффициенты объемной сжимаемости минеральных частиц, воды и скелета грунта основания.

Так, например, для характерных песков с пористостью  $n = 0,42$  данные коэффициенты составляют  $\beta_T = 0,5 \cdot 10^{-4}$  МПа,  $\beta_B = 0,5 \cdot 10^{-3}$  МПа и  $\beta_{СК} = 2 \cdot 10^{-2}$  МПа, а величина  $\sigma(p_{max}) = 0,01 p_{max}$ .

Из многочисленных опытов со взрывами в грунтах Г.М. Ляховым [6] получена зависимость для максимального давления при сферических волнах:

$$p_{max} = K_1 \left( \frac{3\sqrt{C}}{R} \right)^{\mu_1}, \quad (6)$$

где  $p_{max}$  – максимальное давление, МПа;  $C$  – масса заряда, кг;  $R$  – расстояние от центра заряда, м;  $K_1$ ,  $\mu_1$  – эмпирические коэффициенты, зависящие в основном от влажности и содержания газа в грунте. Коэффициент  $\mu_1$  характеризует интенсивность затухания давления с увеличением расстояния от источника динамического воздействия.

В частном случае для водонасыщенных песков с незначительным содержанием в них заземленного газа зависимость (6) для максимального давления ударной волны в грунтах основания имеет вид:

Минаев О.П. Эффективный метод взрывного уплотнения оснований гидротехнических сооружений

$$p_{\max} = 60,0 \left( \frac{3\sqrt{C}}{R} \right)^{1,05}, \quad (7)$$

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

Критическое значение  $\Delta_k$  по экспериментальным данным П.Л. Иванова соответствует такому смещению частиц, при котором происходит полное разрушение структуры грунта основания, что позволяет определять контуры области наилучшего уплотнения грунта основания. Величина  $\Delta_k$  является обобщенной характеристикой для конкретного грунта и определяется из экспериментальных исследований максимальных зон разрушения его структуры и уплотнения. В частности, по результатам опытных взрывов глубинных зарядов в водонасыщенных мелких песках основания значение  $\Delta_k$  может быть принято при рыхлом их сложении равным 5–15 и средней плотности 15–30.

Данное соотношение П.Л. Иванова аналогично формуле профессора Н.В. Seed (США) [10–12] для вычисления коэффициента циклического нагружения, который используется специалистами в области сейсмостойкого строительства во всем мире [13–16], в том числе отечественными [17–19] для выявления условий опасного разжижения грунтов основания при землетрясении.

Рассмотрим взаимодействие зон разжижения грунта для взрыва двух рядом расположенных зарядов.

В составленной на ПК программе использовались формулы (1), (3)–(5) и (7). Расчеты были проведены для зарядов массой 5 кг (обычно принимаемых на практике), размещаемых в плане на расстоянии 8–10 м, и при различной границе  $r_1$  зоны переукладки частиц грунта в процессе консолидации от взрыва предыдущего заряда.

Из рисунка 1 следует, что при последовательном взрыве двух зарядов с интервалом  $\Delta t \geq t_{yn}$  в нижней части в промежутках между зарядами существует значительная «мертвая зона», не подверженная полному разжижению грунта.

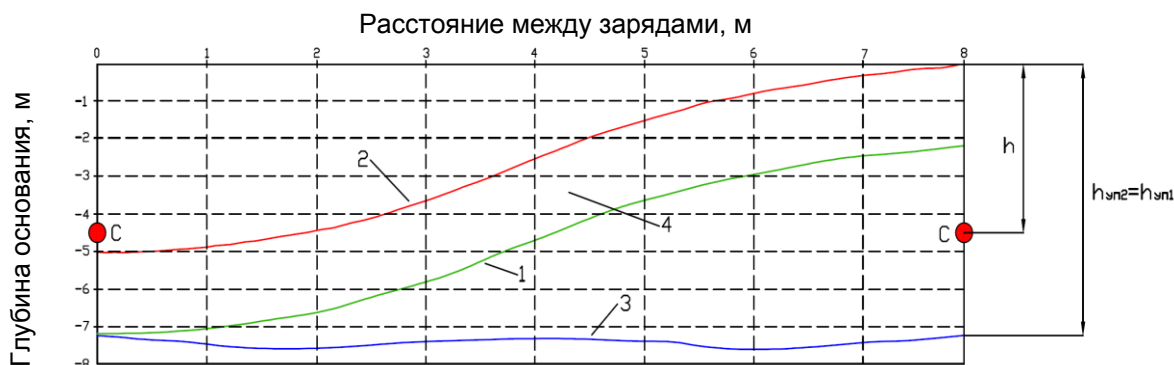
В процессе консолидации грунта граница  $r_1$  разжиженного слоя грунта перемещается к поверхности, и процесс консолидации полностью заканчивается при  $r_1 = h_{yn1}$ . При этом последующий взрыв рядом расположенного заряда с интервалом времени  $\Delta t < t_{yn1}$  позволяет не только обеспечить разжижение грунта в этой неразжиженной зоне, но и повторно воздействовать на грунты основания, подверженные воздействию предыдущего заряда. Данное обстоятельство приводит к многократному разжижению грунта в промежутках между зарядами, повторяющимися при последующих взрывах.

Данные расчеты показали (рис. 2), что наибольшая эффективность взрыва последующего заряда, способствующая разрушению структуры грунта и повторному (многократному) воздействию на грунты основания, достигается при соотношении границы  $r_1$  зоны консолидации грунта от взрыва предыдущего заряда к глубине уплотнения грунта  $h_{yn1}$  в пределах 0,25–0,30, что соответствует аналогичному интервалу между взрывами зарядов  $\Delta t$ .



**Рисунок 1. Характер зон разжижения грунта при последовательном взрыве двух расположенных рядом зарядов с интервалом времени  $\Delta t \geq t_{yn}$ :**

**1 – зона разжижения грунта от взрыва первого заряда; 2 – то же, второго заряда; 3 – «мертвая зона», не подверженная разжижению грунта основания**



**Рисунок 2.** Взаимодействие зон разжижения грунта при последовательном взрывании двух расположенных рядом зарядов с интервалом  $\Delta t \leq t_{yn}$ : 1 – зона разжижения грунта от взрыва первого заряда; 2 – то же в процессе консолидации грунта за время  $\Delta t$ , после взрыва первого заряда; 3 – зона разжижения грунта от взрыва второго заряда с интервалом  $\Delta t = 0,3t_{yn}$ ; 4 – зона повторного разжижения грунта основания

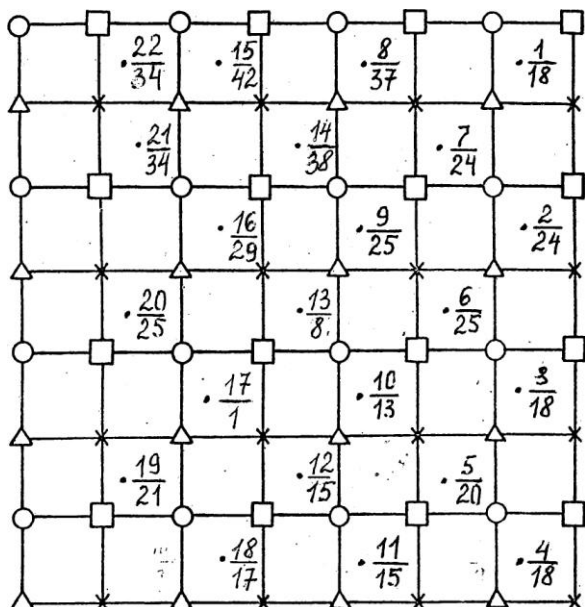
### 3. Опытные испытания

Сравнительные опытные испытания способов последовательного и одновременного взрывания зарядов периодически проводились на различных объектах на строительстве комплекса защитных сооружений Санкт-Петербурга от наводнений. Гранулометрический состав грунтов изменялся от мелкого до среднего. Ниже приведены, как характерные, данные одного из испытаний.

Для этого были выбраны два рядом расположенных участка дамбы, общая мощность слоя отсыпки техногенных мелких и средних песков основания на которых составляла около 7,0 м. На момент проведения взрывных работ дамба была отсыпана до отметки от +1,0 до +1,7 м (при средних отметках +1,2 и +1,4 м соответственно на первой и второй площадках). При этом горизонт уровня воды располагался на отметке около 0,0 от дневной поверхности.

До взрывных работ было проведено статическое зондирование грунтов. Результаты статического зондирования показали, что все отсыпанные под воду пески основания будущей автодороги имели рыхлое сложение (сопротивление внедрению острия зонда  $q_s$  – в основном около 2 МПа) и требуют уплотнения.

Исходя из мощности слоя основания и условия обеспечения камуфлетности взрыва, масса заряда ВВ назначалась равной 6 кг при глубине заложения 4,5–5,5 м. Расстояние между зарядами задавалось равным 10 м, а количество очередей взрывов – 4.



**Рисунок 3.** Опытный участок уплотнения грунта основания последовательным взрыванием зарядов в каждой очереди: круги – заряды 1-й очереди; квадраты – заряды 2-й очереди; кресты – заряды 3-й очереди; треугольники – заряды 4-й очереди; в числителе – порядковые номера поверхностных марок; в знаменателе – суммарная осадка грунта после четырех очередей взрывов



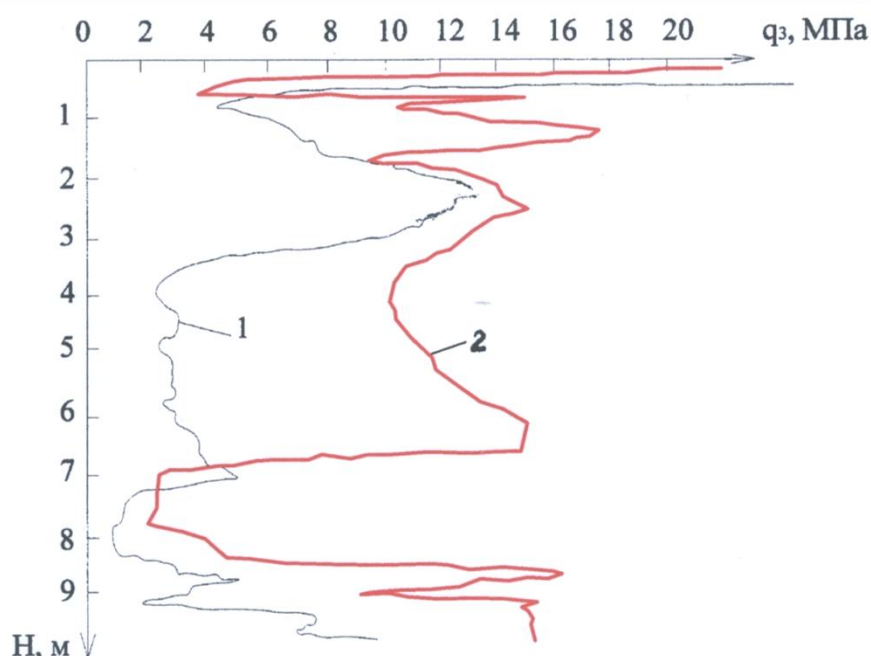
Заряды закладывались в полость обсадной трубы, погруженной вибратором, на глубине заложения 4,5–5,5 м. Расстояние между зарядами задавалось равным 10 м, а количество очередей взрывов – 4.

На каждой площадке основания (рис. 3) было погружено по 64 заряда взрывчатых веществ. Труба снабжалась в нижней части пластиной, которая после погружения заряда выдергивалась вместе с обсадной трубой.

На первой площадке основания производилось одновременное взрывание всех зарядов в каждой очереди, а на второй (см. рис. 3) – последовательное. Таким образом, на первой площадке одновременно взрывалось по 16 зарядов, собранных в единую схему с помощью детонирующего шнура. При этом взрывание зарядов последующей очереди производилось после гарантированного окончания выхода воды (примерно через 30 мин).

На второй площадке основания разрыв между взрывами отдельных зарядов составлял от 3 до 10 мин.

Контроль плотности основания осуществлялся после каждой очереди взрывов по осадке поверхностных марок (колышков), забитых достаточно равномерно на обеих площадках, и статическим зондированием. Окончательное зондирование производилось через 35 суток после проведения взрывных работ с тем, чтобы исключить возможность доуплотнения грунта.



**Рисунок 4. Результаты статического зондирования грунта песчаного основания при последовательном взрывании зарядов: 1 – до взрыва, 2 – после взрыва всех зарядов ( $q_z$  – сопротивление внедрению острия зонда;  $H$  – глубина внедрения зонда)**

Визуальные наблюдения показали, что на первой площадке после взрыва наблюдался интенсивный выход воды в виде фонтанирующих гейзеров. На второй площадке после взрыва отдельного заряда наблюдалось интенсивное отжатие воды, которое усиливалось при взрыве каждого последующего заряда. В конечном итоге поверхностный слой грунта основания постепенно переходил в неустойчивое состояние, при котором после каждого взрыва распространялись волнообразные смещения грунта.

Геодезические измерения осадок (рис. 3) показали, что средняя суммарная осадка поверхности основания на площадке последовательного взрывания после 4 очередей составила 23 см, а одновременного – 21 см. При этом максимальные осадки на первой площадке были 34–36 см, а на второй достигали 38–42 см.

Учитывая, что на первой площадке толщина уплотняемого слоя основания составляла в среднем 5,5 м, а на второй – 4,7 м, имеем величину относительной осадки на участке уплотнения оснований 0,038 и 0,049 для средних осадок и 0,064 и 0,085 для максимальных осадок

соответственно. Таким образом, относительные осадки уплотняемого слоя основания на второй площадке увеличились на 25–30 % по сравнению с первой.

Очень убедительными были результаты статического зондирования. На первой площадке сопротивление внедрению острия зонда изменилось лишь на 4–6 МПа, а на площадке последовательного взрывания (рис. 4) увеличилось с 2 до 10–14 МПа, что свидетельствует о значительном уплотнении грунта основания.

После окончания процесса уплотнения вторая площадка была почти полностью покрыта слоем отжатой воды, а первая гораздо меньше, хотя и имела более низкую среднюю отметку до взрывов.

Данным способом были уплотнены песчаные подушки, поставленные взамен слабых глинистых грунтов в основании водопропускных сооружений, тела дамб, в том числе в основании скоростной автодороги и зданий управления затворами водопропускных сооружений, в основании опор мостов и рамповой части подводного тоннеля при возведении судопропускных сооружений и на других объектах на строительстве КЗС. В результате уплотнения была достигнута проектная плотность песчаных грунтов оснований и сооружений  $I_D \geq 0,6$ , что гарантирует устойчивость их структуры при большинстве внешних, особенно динамических воздействий [20–23].

Общий объем внедрения взрывного метода уплотнения грунтов оснований последовательным взрыванием зарядов за период с 1987 по 2011 г. составил только на строительстве комплекса защитных сооружений Санкт-Петербурга от наводнений около 5 млн. м<sup>3</sup> на различных объектах его основного назначения.

В настоящее время, после завершения строительства в конце 2011 г., КЗС успешно эксплуатируется, обеспечивая защиту Санкт-Петербурга от периодически повторяющихся (не менее 2–3 раз в год) наводнений, а также в качестве транспортной развязки кольцевой автодороги вокруг города.

### Выводы

Проведенные теоретические расчеты и экспериментальные исследования в натуральных условиях, а также опыт практического внедрения позволяют сделать следующие выводы и дать основные рекомендации.

1. Доказана эффективность уплотнения водонасыщенных грунтов оснований способом последовательного взрывания зарядов при площадочном их уплотнении за счет многократного разрушения структуры грунта при последовательном взрывании зарядов в пределах уплотняемого основания.

2. Результаты теоретических исследований по разработанной на ПК программе показали, что оптимальный интервал времени  $\Delta t$  для достижения максимальных зон многократного разрушения и уплотнения структуры грунта при последовательном взрывании зарядов без увеличения глубины уплотнения основания составляет 0,25–0,30  $t_{yп}$ .

При этом гарантированно ликвидируется «мертвая зона», не подверженная разжижению грунта в промежутках между зарядами.

3. Как оказалось, метод уплотнения позволяет не менее, чем на 25–30 % увеличить относительные осадки уплотняемого слоя основания и достигнуть значительно большей плотности укладки грунтов основания, что позволяет сократить количество очередей взрывов для достижения проектной плотности грунтов оснований и сооружений.

Кроме того, способ последовательного взрывания зарядов позволяет сэкономить взрывчатые вещества за счет исключения необходимости монтажа взрывной сети, соединяющей все заряды данной очереди детонирующим шнуром в единую сеть, образующую в плане замкнутый контур.

4. Осуществление взрывного метода уплотнения должно производиться специализированными организациями, имеющими лицензию на данный вид работ. При этом приоритет следует отдавать военным частям, периодически производящим затратные работы по уничтожению взрывчатых веществ, отслуживших гарантированный срок хранения.

5. Данным методом были уплотнены основания и сооружения на различных объектах в ходе строительства комплекса защитных сооружений Санкт-Петербурга от наводнений до относительной плотности песчаных грунтов  $I_D \geq 0,6$ .

Минаев О.П. Эффективный метод взрывного уплотнения оснований гидротехнических сооружений

6. Объем внедрения взрывного метода уплотнения грунтов оснований и сооружений последовательным взрыванием зарядов при строительстве комплекса защитных сооружений Санкт-Петербурга от наводнений составил около 5 млн. м<sup>3</sup>.

### Литература

1. Liman A.K. Compaction of Cohesionless Foundation Soils by Explosives // Civil Engineering. 1940. Vol. 10. Issue 4. Pp. 9–15.
2. Hall C.E. Compacting a dam foundation by blasting // Journal of Soil Mechanics and Foundation Division. 1962. Vol. 88. No.SM 3. Pp. 31–51.
3. Florin V.A., Ivanov P.L. Liquefaction of Saturated Sandy Soils // Proceedings of the Y International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. 1961. Vol. 1. Pp. 182–186.
4. Ivanov P.L. Compaction of Cohesionless Soils by Explosives // Proceedings of the YI Internachional Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Monreal, 1966. Vol. 3. Pp. 352–354.
5. Ivanov P.L., Krasnikov N.D. Charge Expision Sounding of Saturated Cohesionliss Soils // YI Simposium on Earthquake Engineering: University of Roorkee. 1978. Vol.1. Pp. 151–156.
6. Иванов П.Л. Уплотнение несвязных грунтов взрывами. М.: Недра, 1983. 230 с.
7. Dembicki E., Kisielowa N., Nowakowski N., Nowakowski Z. Dynamic Consolidation of Mud Soils by Means of Blasting Changes // International Conference on Compaction. Paris, 1980. Vol. 1. Pp. 295–299.
8. Dembicki E., Kisielowa N., Nowakowski H., Osiecimski R. Compaction of Sandy Marine Subsoils by Means o Blasting // International Conference on Compaction. Paris. 1980. Vol. 1. Pp. 301–305.
9. Пат. 2060320 РФ, МКИ Е 02 Д 3/10. Способ уплотнения слабосвязных грунтов взрывами / О.П. Минаев, А.П. Крутов. Заявл. 05.03.1993г., опубл. в Б.И. 20.05.96, №14.
10. Seed H.B., Idriss I.M. Ground motions and soil liquefaction during earthquakes. Earthquake Engineering Research Institute, Oakland, C.A. USA, 1982. 320 p.
11. Seed H.B., Idriss I.M. Simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential. Soil Mechanics and Foundation Division. 1971. No.97 (SM9). Pp. 1249–1273.
12. Idriss I.M., Boulanger R.W. Soil liquefaction during earthquakes. California: EERI. USA, 2008, 240 p.
13. Ishihara K. Soil Behaviour in Earthquake Geotechnics. Oxford, Clarendon Press: Department of Civil.: Engineering Science University of Tokyo. USA, 2006. 384 с.
14. Ishihara K. New challenges in Geotechnique for ground hazads due to intensely strong earthquake shaking // Geotechnical, Geological and Eathquake Engineering. 2009. No.11. Pp. 91–114.
15. Tsukamoto Y., Ishihara K. Analisis on settlement of soil deposits following liquefaction during earthquakes // Soils and Foundations. 2010. No. 50(3). Pp. 399–441.
16. Ishihara K., Araki K., Toshiyuki K. Liquefaction in Tokyo Bay and Kanto Regions in the 2011 Great East Japan Earthquake // Geotechnical, Geological and Eathquake Engineering. 2014. No. 28. Pp. 93–140.
17. Ильичев В.А., Михеев В.В., Петрухин В.П. НИИОСПу им. Н.М. Герсевича – 75 лет // Основания, фундаменты и механика грунтов. 2006. №5. С.30–32.
18. Ставницер Л.Р. Сейсмостойкость оснований и фундаментов. М.: Издательство Ассоциации Строительных вузов, 2010. 448 с.
19. Уздин А.М., Белаш Т.А., Блехман И.И. О наследии профессора О.А.Савинова // Основания, фундаменты и механика грунтов. 2011. №5. С. 12–17.
20. Минаев О.П., Крутов А.П. Разработка метода уплотнения песчаных водонасыщенных грунтов взрывами в зимних условиях // Гидротехническое строительство. 1993. №7. С.43–46.
21. Минаев О.П. Оценка качества уплотнения водонасыщенных песков зондированием // Основания, фундаменты и механика грунтов. 1994. №4. С.17–20.
22. Минаев О.П. Развитие виброметода уплотнения грунтов в строительстве // Основания, фундаменты и механика грунтов. 2011. №5. С.18–21.
23. Минаев О.П. Разработка динамических методов глубинного уплотнения слабосвязных грунтов оснований // Основания, фундаменты и механика грунтов. 2013. №6. С.21–23.

*Олег Петрович Минаев, Санкт-Петербург, Россия  
Тел. моб.: +7(921)7411535; эл. почта: minaev.op@bk.ru*

© Минаев О.П., 2014



doi: 10.5862/MCE.50.4

## An effective method of explosive compaction of hydraulic structures foundations

**O.P. Minaev***Saint-Petersburg State Polytechnical University, Saint-Petersburg, Russia  
+79217411535; e-mail: minaev.op@bk.ru*

### Key words

bases and structures; hydraulic engineering; water-saturated sand soils; blasting method of compaction; the method of sequential blasting of charges; settlements; density

### Abstract

If an explosive compaction method is used, there are two ways to blast charges in each turn: simultaneous and consecutive. This paper presents the results of theoretical studies, field trials and pilot sealing in production conditions, proving the effectiveness of the method of sequential detonation compared to the simultaneous one with base soils compacting on site. The conducted theoretical studies have shown that sequential detonation of neighboring charges with the time interval  $\Delta t$  that is smaller than the time of compaction of liquefied soil base layer  $t_{UP1}$  from previous charge multiple destruction of soil structure occurs with its consolidation within the limits of the compacted base.

The obtained results of experimental trials have showed an increase in the relative values of average and maximal settlement on the site with sequential detonation compared with the one with the simultaneous one. Accordingly, the resistance of the implementation of the static probe tip  $Q_z$  increased to the values that showed a solid build of sand bases after compacting using the method of sequential detonation of charges.

### References

1. Liman A.K. Compaction of Cohesionless Foundation Soils by Explosives. *Civil Engineering*. 1940. Vol. 10. Issue 4. Pp. 9–15.
2. Hall C.E. Compacting a dam foundation by blasting. *Journal of Soil Mechanics and Foundation Division*. 1962. Vol. 88. No.SM 3. Pp. 31–51.
3. Florin V.A., Ivanov P.L. Liquefaction of Saturated Sandy Soils. *Proceedings of the Y International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 1961. Vol. 1. Pp. 182–186.
4. Ivanov P.L. Compaction of Cohesionless Soils by Explosives. *Proceedings of the YI Internachional Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Montreal, 1966. Vol. 3. Pp. 352–354.
5. Ivanov P.L., Krasnikov N.D. Charge Expision Sounding of Saturated Cohesionliss Soils. *YI Simposium on Earthquake Engineering: University of Roorkee*. 1978. Vol.1. Pp. 151–156.
6. Ivanov P.L. *Uplotneniye nesvyaznykh gruntov vzryvami* [Cohesionless soils sealing by explosions]. Moscow: Nedra, 1983. 230 p. (rus)
7. Dembicki E., Kisielowa N., Nowakowski N., Nowakowski Z. Dynamic Consolidation of Mud Soils by Means of Blasting Changes. *International Conference on Compaction*. Paris, 1980. Vol. 1. Pp. 295–299.
8. Dembicki E., Kisielowa N., Nowakowski H., Osiecimski R. Compaction of Sandy Marine Subsoils by Means of Blasting. *International Conference on Compaction*. Paris. 1980. Vol. 1. Pp. 301–305.
9. Pat. 2060320 RF, MKI Ye 02 D 3/10. *Sposob uplotneniya slabosvyaznykh gruntov vzryvami* [Methods of sealing cohesionless soils by explosions]. O.P. Minayev, A.P. Krutov. Declared March 5, 1993., published May 20, 1996, No.14 (rus)
10. Seed H.B., Idriss I.M. *Ground motions and soil liquefaction during earthquakes*. Earthquake Engineering Research Institute, Oakland, C.A. USA, 1982. 320 p.
11. Seed H.B., Idriss I.M. *Simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential*. Soil Mechanics and Foundation Division. 1971. No.97 (SM9). Pp. 1249–1273.
12. Idriss I.M., Boulanger R.W. *Soil liquefaction during earthquakes*. California: EERI. USA, 2008, 240 p.
13. Ishihara K. *Soil Behaviour in Earthquake Geotechnics*. Oxford, Clarendon Press: Department of Civil.: Engineering Science University of Tokyo. USA, 2006. 384 c.

14. Ishihara K. New challenges in Geotechnique for ground hazards due to intensely strong earthquake shaking. *Geotechnical, Geological and Earthquake Engineering*. 2009. No.11. Pp. 91–114.
15. Tsukamoto Y., Ishihara K. Analysis on settlement of soil deposits following liquefaction during earthquakes. *Soils and Foundations*. 2010. No. 50(3). Pp. 399–441.
16. Ishihara K., Araki K., Toshiyuki K. Liquefaction in Tokyo Bay and Kanto Regions in the 2011 Great East Japan Earthquake. *Geotechnical, Geological and Earthquake Engineering*. 2014. No. 28. Pp. 93–140.
17. Ilichev, V.A., Mikheyev, V.V., Petrukhin, V.P. NIIOSPu im. N.M. Gersevanova – 75let [Research Design and Technology Institute of Foundations and Underground Structures named after N.M. Gersevanov]. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 2006. No.5. Pp. 30–32. (rus)
18. Stavnitser, L.R. *Seysmostoykost osnovaniy i fundamentov* [Seismic stability of bases and foundations]. Moscow: Izd-vo ASV, 2010. 448 p. (rus)
19. Uzdin A.M., Belash T.A., Blekhman I.I. O nasledii professora O.A.Savinova [About the heritage of professor O.A.Savinov]. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 2011. No.5. Pp. 12–17. (rus)
20. Minayev O.P., Krutov A.P. Razrabotka metoda uplotneniya peschanykh vodonasyshchennykh gruntov vzryvami v zimnikh usloviyakh [Development of a method of sealing sand saturated soils by explosions in winter conditions]. *Power Technology and Engineering*. 1993. No.7. Pp. 43–46. (rus)
21. Minayev O.P. Otsenka kachestva uplotneniya vodonasyshchennykh peskov zondirovaniyem [Assessment of the quality of sealing saturated sands sensing]. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 1994. No.4. Pp. 17–20. (rus)
22. Minayev O.P. Razvitiye vibrometoda uplotneniya gruntov v stroitelstve [Development of vibro of sealing of soils in construction]. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 2011. No.5. Pp. 18–21. (rus)
23. Minayev O.P. Razrabotka dinamicheskikh metodov glubinnogo uplotneniya slabosvyaznykh gruntov osnovaniy [Development of dynamic methods of deep sealing weakly cohesive foundation soils]. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 2013. No. 6. Pp. 21–23. (rus)

**Full text of this article in Russian: pp. 32–39**