УДК 624.138

© А. Ф. Юдина, д-р техн. наук, профессор
© Ю. И. Тилинин, канд. техн. наук
(Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет)
E-mail: yudinaantonina2017@mail.ru,
tilinin.yu.i@lan.spbgasu.ru, tilsp@inbox.ru

DOI 10.23968/1999-5571-2018-15-6-62-67

© A. F. Yudina, Dr. Sci. Tech., Professor
© Yu. I. Tilinin, PhD in Sci. Tech.
(Saint Petersburg State University of Architecture
and Civil Engineering)
E-mail: yudinaantonina2017@mail.ru, tilinin.yu.i@lan.
spbgasu.ru, tilsp@inbox.ru

ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИИ УСТРОЙСТВА ДРЕНАЖНЫХ СИСТЕМ НА КОНСОЛИДАЦИЮ НАМЫВНОГО ПЕСЧАНОГО МАССИВА

THE INFLUENCE OF THE TECHNOLOGY OF DRAINAGE SYSTEMS ON THE CONSOLIDATION OF THE ALLUVIAL SAND MASSIF

При создании песчаных массивов искусственной территории гидротехническим способом применяется вертикальный дренаж для отвода грунтовой воды из толщи песка. Одновременно с осушением массива происходит осадка и уплотнение насыпи. Консолидация насыпи обычно длится более трех лет. Применение вертикальных скважин, заполненных спрессованным щебнем, сокращает время уплотнения.

Ключевые слова: искусственная территория, мокрый песок, вертикальный дренаж, время, консолидация, скважина, спрессованный щебень, виброфлот, плотность.

When creating sand alluvial artificial territories with the hydraulic engineering method, vertical drainage is used to divert ground water from the strata of sand. Simultaneously with the dewatering of the soil massif, there takes place sediment and compaction of the landfill. Consolidation of the soil usually lasts over three years. The use of vertical wells filled with compressed rubble reduces the compaction time.

Keywords: artificial territory, wet sand, vertical drainage, time, consolidation, well, compressed rubble, vibroflot, density.

Создание новых искусственных намывных территорий на побережье Финского залива связано с проблемой длительного выдерживания территории до начала строительных работ с целью осадки и консолидации искусственного массива [1].

В сборниках научных трудов института гидромеханизации (ВНИИГС), издаваемых в 1980-е годы под общей редакцией В. В. Верстова, были опубликованы научные достижения лаборатории намывных сооружений, на базе которых продолжаются современные исследования в области совершенствования технологии ускорения процессов осадки и консолидации водонасыщенных песков, уложенных в многослойный

массив методами гидротехнического намыва. Естественная осадка насыщенного водой песка происходит постепенно в течение нескольких лет по мере отделения воды из намытой толщи. Чтобы ускорить процесс отделения воды из песчаной толщи, применяют дренирование — один из способов искусственного отвода грунтовой влаги путем создания водотоков в виде дренажных конструкций в природном или искусственном грунте [2].

Если предусмотреть дренаж, то сроки ожидания консолидации намытого грунта заметно сокращаются. Дренаж выполняется в виде вертикальных ленточных дрен, площадного дре-

нажного щебеночного слоя, щебеночных свай, а также заполненных щебнем траншей.

Щебеночные сваи выполняются в виде скважин диаметром от 400 до 600 мм [3]. Скважины заполнены уплотненным щебнем и размещены в плане квадратно-гнездовым способом на расстоянии от 2,0 до 5,0 м. Щебеночные сваи, которые совмещены с временным нагружающим слоем песка, обеспечивают выдавливание поровой воды из массива (рис. 1).

Толщина нагрузочного слоя определяется (СНиП2.05.02–85) по формуле

$$h_{\text{пр}} > \frac{0,5Dg_{\text{в}}J_0 - p_{\text{расч}}}{g_{\text{пр}}}, \quad (1)$$

где D — два радиуса зоны дренирования (при расположении дрен с шагом не более 5 м, равно расстоянию между дренами); $g_{\text{в}}$ — удельный вес грунтовой воды; J_0 — начальный градиент фильтрации грунта (отношение напора к длине пути фильтрации, пороговая величина), по данным наблюдений принимается $J_0 = 3$; $p_{\text{расч}}$ — нагрузка от насыпи; $g_{\text{пр}}$ — удельный вес намывного песка нагружающей насыпи.

Степень консолидации массива определяется по формуле

$$U_{\text{общ}} = 100 - 0,01(100 - U_{\text{г}})(100 - U_{\text{в}}), \quad (2)$$

где $U_{\text{г}}$ — степень консолидации при горизонтальной фильтрации воды (к дренам); $U_{\text{в}}$ — то же при вертикальной фильтрации воды из песчаного массива.

Величины $U_{\text{г}}$ и $U_{\text{в}}$ устанавливаются по зависимостям (рис. 2). Время при определении $U_{\text{в}}$ рассчитывают по формуле

$$T_{\text{в}} = \frac{C_{\text{в}}T}{H_{\text{ф}}^2}, \quad (3)$$

где $C_{\text{в}}$ — коэффициент консолидации вертикальной фильтрации; T — требуемый срок консолидации; $H_{\text{ф}}$ — расчетный путь вертикальной фильтрации.

Время, необходимое для определения $U_{\text{г}}$, вычисляется по формуле

$$T_{\text{г}} = \frac{C_{\text{г}}T}{l^2}, \quad (4)$$

где $C_{\text{г}}$ — коэффициент консолидации грунта горизонтальной фильтрации; l — расстояние между дренами.

Сокращение времени консолидации производится уменьшением шага дрен.

Продольные дренажные траншеи (ленточные дренаи), заполненные щебнем и расположенные параллельно через 2,5 м, выполняют функцию дренажа. Ширина траншейного дренажа составляет обычно 0,6–1,0 м.

При определении степени консолидации горизонтальной фильтрации щебеночных дрен используется график, разработанный по аналогии пособия к СНиП2.05.02–85 с пересчетом на песчаный консолидируемый грунт и щебеночные сваи по результатам проведенного исследования, приведенный на рис. 3, где величина $U_{\text{г}}$ дана в зависимости от величины $T_{\text{г}}$ для различных значе-

Рис. 1. Песчаная нагружающая насыпь и щебеночные сваи:
1 — временный нагружающий слой песка; 2 — массив насыщенного водой намывного грунта; 3 — щебеночная свая; 4 — подстилающий природный дренирующий слой

Рис. 2. Консолидация массива с щебеночными сваями (по аналогии пособия к СНиП2.05.02–85 с пересчетом на песчаный консолидируемый грунт и щебеночные сваи по результатам исследования): а — при вертикальной фильтрации; б — при горизонтальной фильтрации; $n = l/d$, где l — расстояние между дренами (в свету); d — диаметр дрена

ний l/H (где l — расстояние между боковыми поверхностями прорезей).

Щебеночные сваи, достигающие плотных пород, работают в качестве стоек, но главное, что они пересекают природный дренирующий слой. Вертикальные ленточные дренаи представляют собой ленты из рулонного волокнистого материала, установленные вертикально в грунте, влажность которого в пределах $1 > d > 0,8$, а коэффициент фильтрации не превышает 10^{-5} м/сут.

Применение вертикальных ленточных дренаи рационально при критическом значении напора H_k (м), определяемом из условия

$$H_k > 0,5d_c J_0^u, \quad (5)$$

где d_c — диаметр зоны дренирования, м; J_0^u — начальный градиент фильтрации и.

Минимальная толщина нагружающей насыпи $h_{пр}$ (см) определяется из условия:

$$h_{пр} \geq \frac{1}{\rho_s} (0,5d_e \rho_e J_0^u - \rho_s H_n), \quad (6)$$

где ρ_e , ρ_s — плотность влажного грунта и воды; d_e — эффективный диаметр дренаи; J_0^u — начальный градиент фильтрации; H_n — проектная высота насыпи, м.

Эффективный диаметр дренаи d_e принимается для шахматной схемы — $d_e = 1,13l$; для схемы в виде ромба — $d_e = 1,05l$ [4].

Коэффициент фильтрации полотна ленточной дренаи должен быть не менее 38 м/сут при основной нагрузке 0,07 МПа.

Рис. 3. Консолидация массива с дренажными прорезями (по аналогии пособия к СНиП2.05.02–85 с пересчетом на песчаный консолидируемый грунт и щебеночные прорези по результатам исследования)

Комплексный технологический процесс устройства ленточных дрен включает в себя следующие процессы:

- подсыпка и планировка;
- разметка мест погружения ленточных дрен;
- погружение ленточных дрен;
- досыпка насыпи до проектных отметок.

Простой процесс погружения дрен состоит из следующих операций:

- заправка дрены в обсадную трубу;
- погружение и извлечение обсадной трубы;
- обрезка ленточной дрены;
- перемещение установки к месту погружения очередной дрены;
- замена катушки с дренаем;
- сшивка концов лент закончившейся и очередной катушек.

Пропуск ленточной дрены через обсадную трубу выполняется с помощью специального приспособления или жесткой проволоки диаметром около 4 мм. Ленточная дрена выпускается на 30–40 см из обсадной трубы и крепится якорем в ее нижний обрез [5].

Обсадная труба без обратного хода погружается до нижней проектируемой отметки. После достижения нижней отметки труба движется обратным ходом вверх, а ленточный дренаж остается в массиве грунта, удерживаемый за нижний конец якорем. После того как обсадная труба полностью извлечена, ее нижний обрез превышает поверхность земли на 300 мм, что позволяет выполнить отсечение дрены ножом или ножницами, оставляя около 20 см для крепления якоря, устанавливаемого снова в трубу.

Ленточные дрена вводят в массив песка в обсадной трубе, которая вдавливается в грунт установкой на базе гусеничного экскаватора [6] (рис. 4).

Дрена устанавливаются с шагом 1,5–3 м. По результатам экспертного опроса специалистов технической экспертизы проектов сделан вывод, что этот метод дренирования приемлем в дорожном строительстве. По общему мнению для долговечного использования на вновь образованной территории его применять неэффективно.

В строительстве часто применяют **щебеночные сваи**, потому что они наиболее долговечны. Сваи представляют собой вертикальные скважины, заполняемые щебнем крупностью от 5 до

Рис. 4. Установка ленточных вертикальных дрен

50 мм. Их устройство производится в следующей технологической последовательности: в грунт вибропогружателем заглубляют металлическую трубу с инвентарным самораскрывающимся наконечником. По достижении трубой проектной глубины по мере подъема трубы вверх в нее порциями подается щебень. При подъеме инвентарный башмак обсадной трубы раскрывается, и щебень под действием собственного веса и вибрации высыпается в образованную трубой скважину. Каждая порция щебня уплотняется многократными возвратно-поступательными движениями трубы. Очередная порция щебня через приемную воронку загружается в трубу. Для выгрузки щебня из трубы в скважину в нижней ее части могут быть предусмотрены раскрывающиеся при движении трубы вверх лепестки или теряемый бетонный башмак (рис. 5).

Рис. 5. Устройство щебеночных свай:
1 — стальная труба; 2 — щебень; 3 — трамбовка;
4 — песчаная свая; 5 — башмак

В современных условиях внедряется зарубежный опыт устройства щебеночных свай с использованием виброфлота. Первая практика устройства щебеночных свай виброфлотом фирмы Betterground была на строительстве скоростной автомагистрали Москва — Санкт-Петербург: на втором объекте с шагом 2 м устроено 5000 щебеночных свай с глубиной заложения 21 м [7] на намывной территории у берегов Крестовского острова.

Виброфлотация эффективна для несвязных грунтов с низким содержанием глинистых фракций. К таким грунтам относятся пески различной крупности, которые хорошо подвергаются уплотнению. При изготовлении щебеночных свай глубиной от 3 до 30 м используется виброфлот диаметром от 290 до 460 мм, устанавливаемый на экскаваторе, кране или копровой установке. Производительность виброфлота — от 200 до 400 погонных метров свай за смену [8].

Принципиальная схема создания щебеночных свай виброфлотом показана на рис. 6.

Работающий виброфлот, взаимодействуя с водой, под собственным весом погружается в мокрый массив песка. В бункер виброфлота грузчиком периодически подается щебень, поступающий по трубопроводу в забой скважины. Щебень и стенки скважины уплотняются возвратно-поступательными движениями. Проектные характеристики щебеночной сваи формируются посредством программирования соответствующего режима работы виброфлота (рис. 7) [2].

Бортовым компьютером контролируются уплотнение, глубина, расход материала, кроме

Рис. 7. Процесс устройства щебеночных свай

того, выполняется контроль методами статического и динамического зондирования грунтов.

Простой процесс устройства щебеночных свай состоит из следующих технологических операций:

1. Обсадная труба с закрытым наконечником заглубляется на проектную отметку вибропогружателем или другими механизмами.
2. Через приемную воронку в трубу отдельными порциями засыпают мелкий щебень на высоту 3 м.
3. При помощи вибропогружателя труба извлекается на 3 м, при этом в скважине остается столб щебня.
4. Выполняется уплотнение щебня обсадной трубой, после чего в нее подается очередная порция щебня [9].

Сменная производительность виброфлота — около восьми свай, приблизительно 80 м³ щебня.

Выводы. Исследование влияния технологии устройства дренажных систем на консолидацию намывного песчаного массива свидетельствует о том, что наибольшее сокращение сроков консолидации массива достигается примени-

Рис. 6. Создание щебеночных свай виброфлотом

ем в качестве дренирующего материала щебня, укладываемого в скважины виброфлотом. Изготовленные виброфлотом щебеночные сваи можно соединять между собой пластинами щебня и нагружать искусственную территорию временным намытым слоем. Такое сочетание технологий, способствующих сокращению сроков консолидации, дает наибольший эффект. Дополнительным преимуществом щебеночных свай является армирование песчаного массива. Устройство прорезей в песке без установки крепи не представляется возможным, что исключает их применение при намыве территории. Установку вертикального ленточного дренажа выполнять на срок более года нерационально. Поэтому эти технологии не дают достаточного эффекта в условиях гидротехнического намыва искусственных территорий.

Библиографический список

1. Гайдо А. Н. Пути совершенствования технологических решений устройства свайных фундаментов жилых зданий в условиях городской застройки // Жилищное строительство. 2015. № 9. С. 12–15.
2. Справочник геотехника. Основания, фундаменты и подземные сооружения / под общ. ред. В. А. Ильичева, Р. А. Мангушева. М.: АСВ, 2014. 728 с.
3. Верстов В. В., Гайдо А. Н. Совершенствование технологии устройства водонепроницаемых ограждений котлованов при формировании искусственных островов и намытых территорий // Геотехника. 2014. № 1–2. С. 52–59.
4. Мангушев Р. А., Карлов В. Д., Сахаров И. И., Осокин А. И. Основания и фундаменты. М.: АСВ, 2012. 356 с.
5. Мангушев Р. А., Осокин А. И., Усманов Р. А. Устройство и реконструкция оснований и фундаментов на слабых и структурно-неустойчивых грунтах / под ред. Р. А. Мангушева. СПб.: Лань, 2018. 460 с.
6. Verstov V., Judina A. Improving technological processes for borehole drilling in construction using vibration impact // *Applied Mechanics and Materials*. 2015. Vol. 725–726. Pp. 220–225.
7. Верстов В. В., Гайдо А. Н. Эффективные технологии устройства ограждений котлованов на акваториях // Вестник гражданских инженеров. 2013. № 6 (41). С. 75–84.
8. Gajdo A., Verstov V., Judina A. Comparative Efficiency Investigation of Various Types of Dynamic Influences on the Dipped Pile // *World Applied Sciences Journal*. 2013. Vol. 23 (6). Pp. 817–822.
9. Гайдо А. Н., Верстов В. В., Иванов Я. В. Технологии устройства ограждений котлованов в условиях городской застройки и акваторий. СПб.: СПбГАСУ, 2014. 368 с.
1. Gaydo A. N. Puti sovershenstvovaniya tekhnologicheskikh resheniy ustroystva svaynykh fundamentov zhilykh zdaniy v usloviyakh gorodskoy zastroyki [The ways to improve technological solutions in construction of pile foundations of residential buildings in urban areas]. *Zhilishchnoe stroitel'stvo – Housing construction*, 2015, no. 9, pp. 12–15.
2. *Spravochnik geotekhnika. Osnovaniya, fundamenty i podzemnye sooruzheniya* [Reference book of geotechnical engineering. Bases, foundations and underground structures]. Ed. by Il'ichev V. A., Mangushev R. A. Moscow, ASV Publ., 2014, 728 p.
3. Verstov V. V., Gaydo A. N. Sovershenstvovanie tekhnologii ustroystva vodonepronitsaemykh ograzhdeniy kotlovanov pri formirovani iskusstvennykh ostrovov i namyvnykh territoriy [Improving construction technologies of waterproof pit enclosing designs at forming artificial islands and alluvial sand territories]. *Geotekhnika – Geotechnical Engineering*, 2014, no. 1–2, pp. 52–59.
4. Mangushev R. A., Karlov V. D., Sakharov I. I., Osokin A. I. *Osnovaniya i fundamenty* [Bases and foundations]. Moscow, ASV Publ., 2012, 356 p.
5. Mangushev R. A., Osokin A. I., Usmanov R. A. *Ustroystvo i rekonstruktsiya osnovaniy i fundamentov na slabyykh i strukturno-neustoychivyykh gruntakh* [Design and reconstruction of bases and foundations on weak and structurally unstable soils]. Ed. by Mangushev R. A. St. Petersburg, Lan' Publ., 2018, 460 p.
6. Verstov V., Judina A. Improving technological processes for borehole drilling in construction using vibration impact. *Applied Mechanics and Materials*, 2015, vol. 725–726, pp. 220–225.
7. Verstov V. V., Gaydo A. N. *Ehffektivnye tekhnologii ustroystva ograzhdeniy kotlovanov na akvatoriyakh* [Effective technologies at foundation pit protection at water areas]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2013, no. 6 (41), pp. 75–84.
8. Gajdo A., Verstov V., Judina A. Comparative Efficiency Investigation of Various Types of Dynamic Influences on the Dipped Pile. *World Applied Sciences Journal*, 2013, vol. 23 (6), pp. 817–822.
9. Gaydo A. N., Verstov V. V., Ivanov Ya. V. *Tekhnologii ustroystva ograzhdeniy kotlovanov v usloviyakh gorodskoy zastroyki i akvatoriy* [Construction technologies of pit enclosing designs in conditions of urban development and water areas]. St. Petersburg, SPSUACE Publ., 2014, 368 p.