

СОВРЕМЕННЫЙ ПОДХОД К МЕТОДАМ УПЛОТНЕНИЯ СЛАБЫХ ВОДОНАСЫЩЕННЫХ ГРУНТОВ ОСНОВАНИЯ. МЕТОД ВАКУУМИРОВАНИЯ

MODERN APPROACH TO THE METHODS OF SOFT WATER-SATURATED SOILS IMPROVEMENT. THE VACUUM CONSOLIDATION METHOD

Ф. Ф. ЗЕХНИЕВ, канд. техн. наук
Д. А. ВНУКОВ
А. В. САЗОНОВА

С освоением новых территорий растет необходимость в инженерной подготовке оснований, сложенных слабыми водонасыщенными грунтами. Наибольшее распространение получил метод предпостроечного уплотнения грунтов основания пригрузочной насыпью при небольшой толщине слоя слабых грунтов и использование его с вертикальными дренами при толщине слабых грунтов значительных размеров. В последнее время во многих странах мира все большее применение для решения таких задач находит метод вакуумирования, основанный на приложении к грунтовому массиву вакуумного давления. запатентованный еще в 1950-х годах, он претерпел ряд изменений и технологических усовершенствований с целью повышения эффективности и сокращения затрат на производство работ. Анализируя методологию применения вакуумирования, в современном строительстве можно выделить два основных способа – мембранный и безмембранный, каждый из которых имеет свою специфику.

With the development of new territories there is a growing need in the soft water-saturated soils improvement. The most common method is preloading of soft soils by surcharge load, when the soil layer has a small thickness, and the combination of surcharge preloading with vertical drains, when the thickness of the soil layer is large. In recent years the method of vacuum consolidation is increasingly used to solve such problems in many countries of the world. It is based on the use of vacuum pressure on the soil. Patented in 1950-s, it has undergone several modifications and technological improvements with the aim of improving efficiency and reducing the cost of the work. In modern construction an analysis of the methodology for using this method, it is possible to distinguish two main systems — membrane and membraneless, each of which has its own specifics. This article discusses the principle of this method and the main directions of its development.

В статье рассматриваются принцип действия метода вакуумирования, а также основные направления его развития.

Ключевые слова:

Вакуумирование, вертикальная дрена, пригрузочная насыпь, слабый грунт, уплотнение грунта

Key words:

Soft soil, soil improvement, surcharge fill, vacuum consolidation, vertical drain

Введение

В условия современного строительства появилась необходимость освоения территорий, сложенных слабыми грунтами, характеризующимися полным водонасыщением, высокой сжимаемостью, малыми прочностью и модулем деформации. В таких условиях особенно важное значение приобретает инженерная подготовка территории к строительству [1].

Для инженерной подготовки слабых водонасыщенных грунтов основания широкое применение получил метод предварительного уплотнения их перед строительством с целью улучшения их прочностных и деформационных свойств [1] (рис.1).

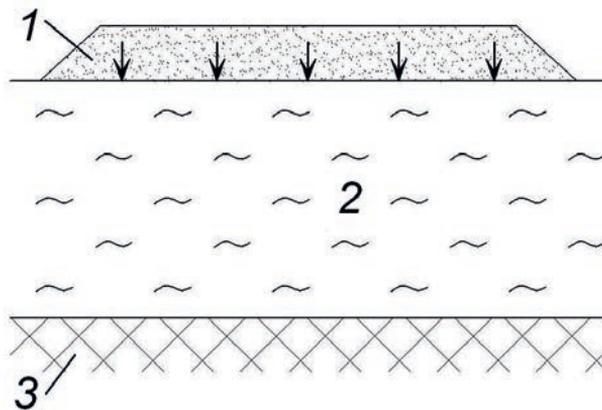


Рис. 1. Принципиальная схема уплотнения слабых грунтов пригрузочной насыпью: 1 – пригрузочная насыпь; 2 – слабый грунт; 3 – водоупор

Однако при большой толще слабых грунтов, учитывая, что водопроницаемость их в вертикальном направлении сравнительно невелика, процесс консолидации занимает весьма длительное время. Для значительного сокращения сроков консолидации применяются вертикальные дрены, которые значительно сокращают пути фильтрации поровой воды, отжимающейся из толщи основания до дренажной поверхности под давлением, создаваемым временной нагрузкой [1]. Наиболее часто при предпостроечном уплотнении применяются ленточные и песчаные дрены (рис. 2).

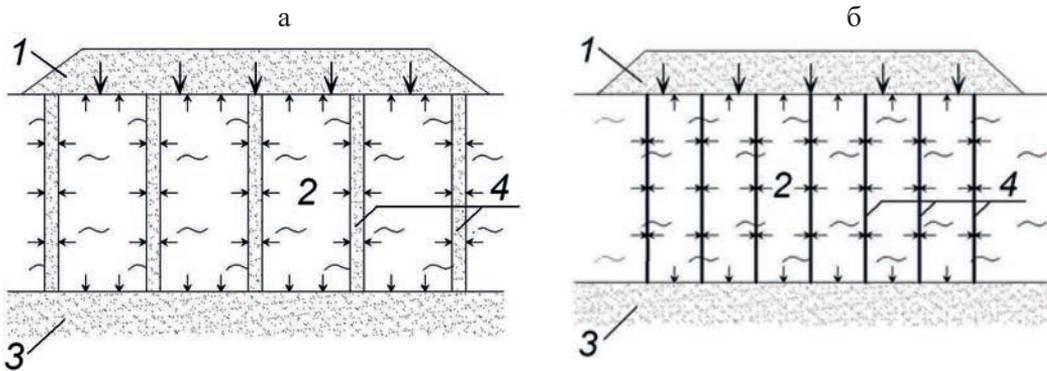


Рис. 2. Принципиальные схемы уплотнения слабых грунтов пригрузочной насыпью с вертикальными дренами: а — с песчаными дренами; б — с ленточными дренами; 1 – пригрузочная насыпь; 2 – слабый грунт; 3 – фильтрующий слой; 4 – дрена

Помимо указанных методов, в последнее время все большую популярность в разных странах мира набирает метод вакуумирования, который в отдельных случаях позволяет избежать потери устойчивости, связанной с устройством пригрузочной насыпи, и сократить затраты на ее устройство.

Метод вакуумирования

В 1952 г. В. Кьеллман (Швеция) запатентовал метод вакуумирования для предпостроечного уплотнения слоев глинистых грунтов (рис. 3) [6].

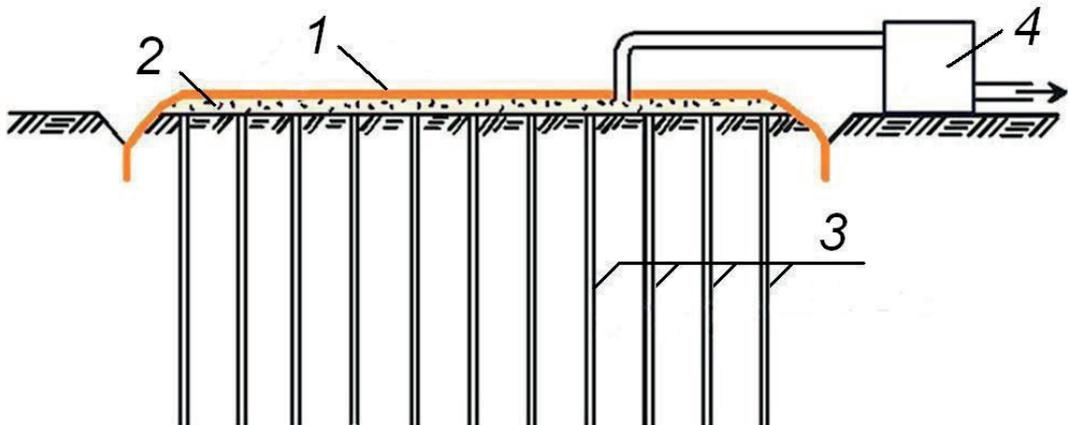


Рис. 3. Принципиальная схема уплотнения слабых грунтов методом вакуумирования: 1 – мембрана; 2 – фильтрующий песчаный слой; 3 – вертикальные дрена; 4 – вакуумный насос

Система вакуумирования в общем случае включает в себя дренажную систему, изолирующую систему и систему вакуумных насосов [3]. Дренажная система состоит из взаимосвязанной сети вертикальных дрен, горизонтальных дренирующих труб

и фильтрующего песчаного слоя. Изолирующая система представлена главным образом геомембраной. По средствам системы насосов в грунтовом массиве создается требуемое вакуумное давление.

Рассмотрим принцип работы системы вакуумирования на примере однородного основания, представленного слоем слабого водонасыщенного грунта.

Как правило, при расчетах консолидации грунтового основания не учитывается атмосферное давление P_a , так как это не влияет на конечный результат расчета [10]. Однако для понимания механизма вакуумирования учитывать его необходимо.

Перед приложением вакуумного давления величины общего напряжения, порового давления и эффективного напряжения определяются по формулам соответственно (1), (2) и (3):

$$\sigma = P_a + h\gamma + z\gamma_{sb}, \tag{1}$$

$$u = P_a + z\gamma_w, \tag{2}$$

$$\sigma' = \sigma - u = h\gamma + z(\gamma_{sb} - \gamma_w), \tag{3}$$

где σ – общее напряжение; u – поровое давление; σ' – эффективное напряжение; P_a – атмосферное давление; h – глубина залегания уровня подземных вод; γ – удельный вес грунта; z – глубина от уровня подземных вод; γ_{sb} – удельный вес грунта с учетом взвешивающего действия воды; γ_w – удельный вес воды.

При создании в массиве грунта вакуумного давления общее напряжение остается неизменными, а поровое давление становится равным

$$u = z\gamma_w. \tag{4}$$

При этом величина эффективного напряжения принимает следующий вид:

$$\sigma' = \sigma - u = P_a + h\gamma + z(\gamma_{sb} - \gamma_w). \tag{5}$$

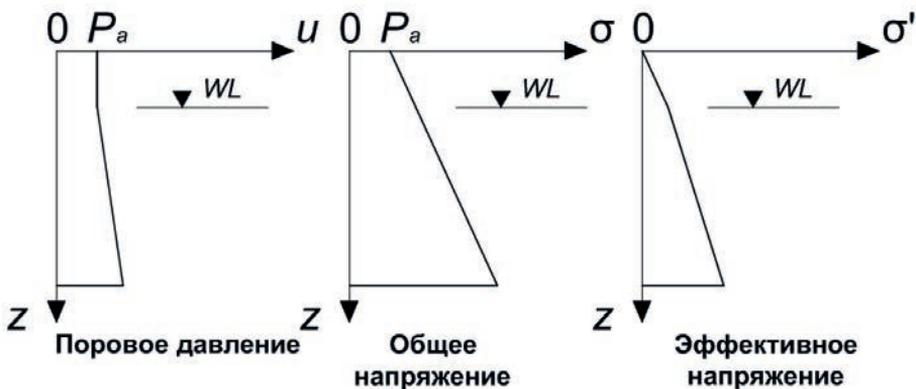
Следовательно, величина приращения эффективных напряжений ($\Delta\sigma'$) в процессе приложения вакуумного давления равна

$$\Delta\sigma' = nP_a, \tag{6}$$

где n – показатель эффективности применения метода вакуумирования, $n \leq 1$.

На рис. 4 представлено распределение порового и эффективного давлений в грунтовом массиве до и во время приложения вакуумного давления.

а



6

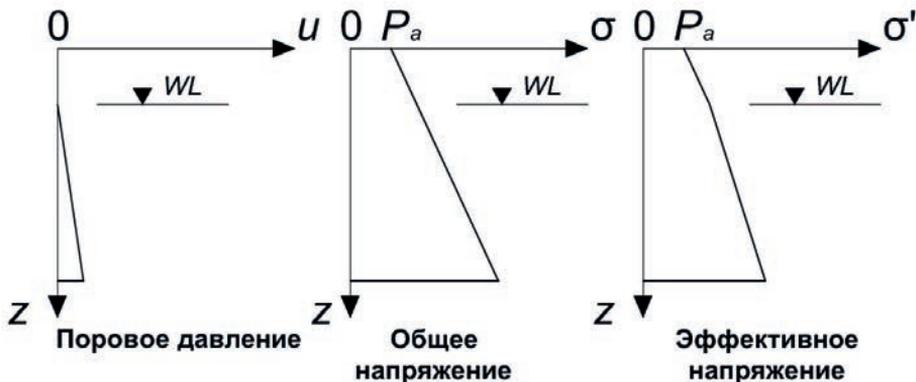


Рис. 4. Эпюры напряжений в массиве слабого водонасыщенного грунта: а — до приложения вакуумного давления; б — во время приложения вакуумного давления; P_a – атмосферное давление; u – поровое давление; σ' – эффективное напряжение; σ – общее напряжение

Теоретически величина давления в поровой воде в процессе вакуумирования должна достигать величины атмосферного давления (~ 100 кПа) [10], однако на практике она составляет лишь 60-70 кПа ввиду имеющихся потерь, вызванных неидеальной герметичностью системы. Следует отметить, что нагрузка, вызванная вакуумным давлением, соответствует нагрузке от пригрузочной насыпи высотой 3 – 3,5 м.

В случае, когда необходимо уплотнение слоя слабых грунтов большой толщины, дополнительно метод вакуумирования комбинируют с устройством пригрузочной насыпи [5, 6].

Развитие метода вакуумирования в странах мира

Хотя метод вакуумирования был предложен еще в 1950-х годах, долгое время имела место проблема поддержания постоянного вакуумного давления в течение всего процесса консолидации, вследствие чего этот метод не имел широкого использования еще несколько десятилетий. По мере технологического прогресса, а также усовершенствования и создания новых эффективных материалов (например, геомембран) метод вакуумирования стал применяться во многих странах мира [3], особенно в Европе, США, Китае, Японии и в некоторых других азиатских странах [11].

Интенсивное развитие метода вакуумирования приходится на начало 1980-х годов [10, 11].

Начиная с 1982 г., в Китае метод вакуумирования был применен для инженерной подготовки грунтов оснований зданий и сооружений транспортной морской инфраструктуры. В дальнейшем метод нашел применение на строительстве скоростных автомагистралей, взлетно-посадочных полос и дамб, а также жилых объектов [3, 11].

С 1988 г. французская компания Menard проводит многочисленные исследования в этой области [3]. Результатом их стала разработка собственной системы вакуумирования – Menard Vacuum System (рис. 5). В отличие от классической схемы, разработанной в 1950-х годах, вместо вертикальных дрен здесь используются специальные цилиндрические дренажные трубы.

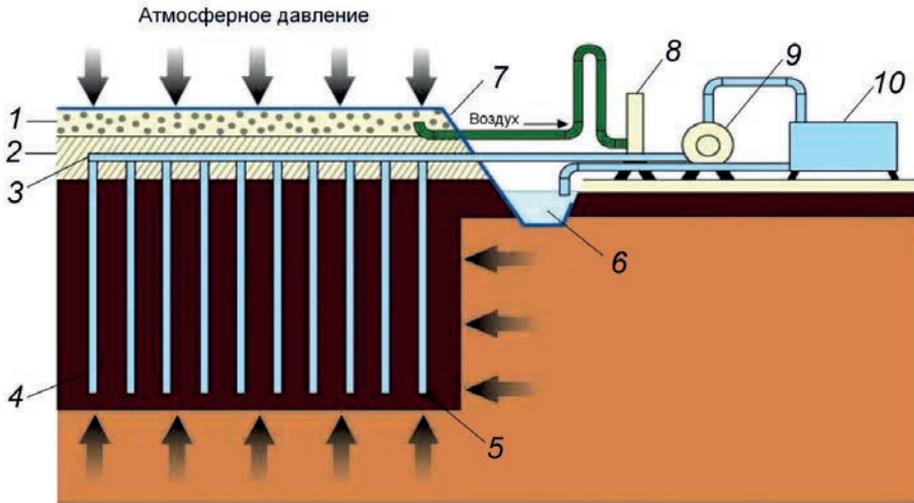


Рис. 5. Принципиальная схема вакуумирования слабых грунтов компании Menard [11]: 1 – насыпь; 2 – дренирующий слой; 3 – горизонтальные дрены; 4 – цилиндрические дренажные трубы; 5 – дренажная скважина; 6 – траншея, заполненная бентонитом и полиакрилатом; 7 – геомембрана; 8 – бустер; 9 – вакуумный насос; 10 – водоочистная станция

В качестве альтернативы к традиционным вакуумным технологиям в начале 2000-х годов голландской компанией Sofra B.V была разработана технология вакуумного уплотнения грунта, в которой за счет непосредственного соединения вертикальных дрен с системой вакуумных насосов посредством специальных воздухо-непроницаемых шлангов пропадает необходимость использования геомембраны в качестве изолирующего слоя (рис. 6) [2, 6, 8]. В результате к дренам может применяться вакуумное воздействие.

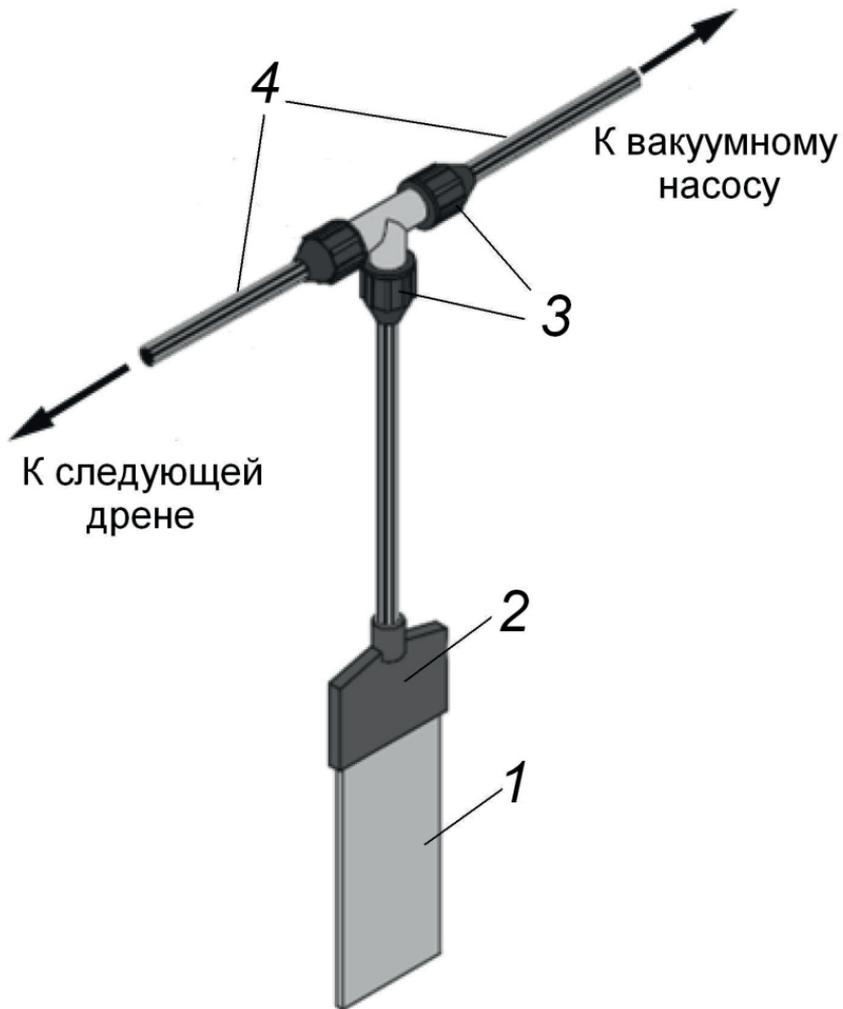


Рис. 6. Схема соединения вертикальной дрены с горизонтальной системой шлангов, используемая в системе вакуумирования слабых грунтов компании Sofra B.V.: 1 – ленточная дрена; 2 – соединительный колпак; 3 – соединительные муфты; 4 – воздухонепроницаемые шланги

Другим примером безмембранного метода вакуумирования является система, разработанная бельгийской компанией Silt NV еще в конце 90-х годов [3]. В качестве вертикальных дренажных элементов здесь используются песчаные дрены, а роль горизонтального дренажа выполняет песчаный фильтрующий слой, залегающий в основании толщи слабого грунта, что соответственно накладывает ограничения на использование такого метода. Вакуумные насосы устанавливаются вокруг уплотняемой области в специально пробуренных водозаборных скважинах (рис. 7).

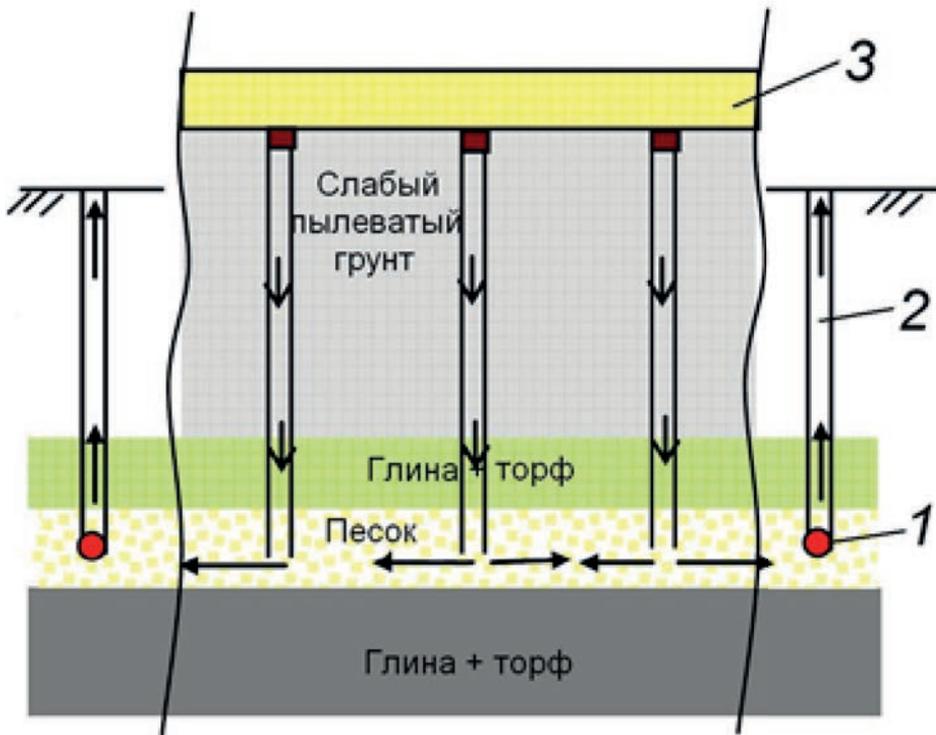


Рис. 7. Принципиальная схема вакуумирования слабых грунтов компании Silt NV: 1 – вакуумный насос; 2 – водозаборная скважина; 3 – песчаная платформа

Параллельно с разработкой безмембранных методов вакуумирования был выявлен существенный недостаток мембранного метода. Система могла производить вакуумное давление на насосе и под геомембраной соответственно около 80 и 60 кПа. Однако давление вакуума, создаваемое под геомембраной, значительно снижалось в процессе выполнения операции [6]. В 2002 г. японской компанией Maruyama Industry Co., Ltd была внедрена система разделения воздуха и воды, которая позволяет поддерживать высокое вакуумное давление (более 80 кПа) в процессе консолидации (рис. 8) [3, 6]. Устройство непосредственно под геомембраной специальных связанных между собой резервуаров для разделения воздуха и воды привело к увеличению расчетного срока производства работ по предпостроечному уплотнению.

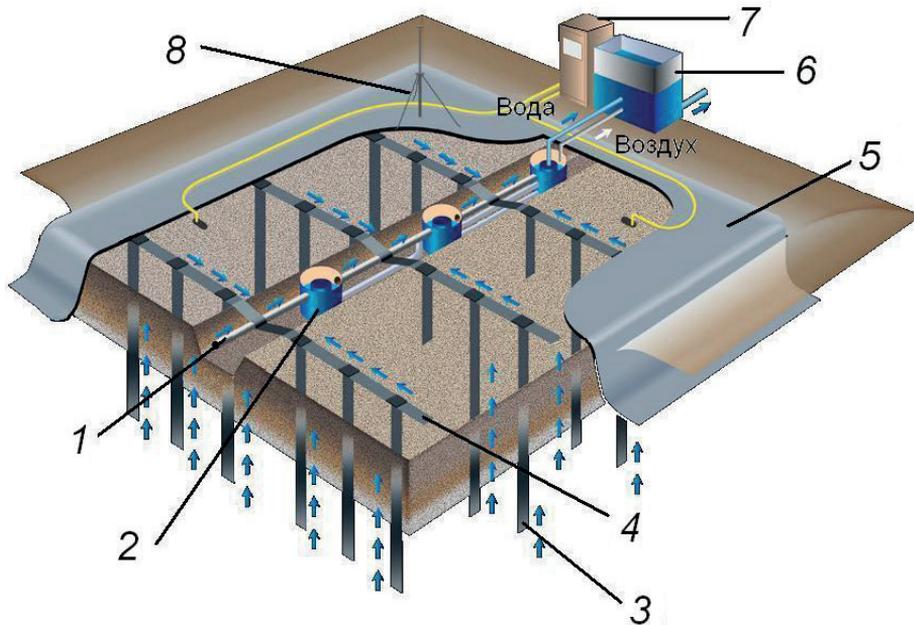


Рис. 8. Принципиальная схема вакуумирования слабых грунтов компании *Maguyama Industry Co., Ltd*: 1 – перфорированная дренажная труба; 2 – резервуар для разделения воды и воздуха; 3 – вертикальные дрены; 4 – горизонтальные дрены; 5 – воздухонепроницаемая пленка; 6 – вакуумный насос; 7 – система мониторинга; 8 – устройство измерения осадок

Метод вакуумирования слабых грунтов был успешно применен при строительстве таких объектов как контейнерный терминал на реке Кай Меп в г. Вунгтау (Вьетнам); очистная станция в г. Пусан (Южная Корея); электростанция Ка-Мау в г. Хошимин (Вьетнам); Международный круизный терминал (Сингапур); аэропорт Суварнабхуми в Таиланде; автомагистраль А2 в г. Винквен (Нидерланды); автомагистраль Север-Юг в Малайзии; порт Брисбен в г. Квинсленд (Австралия) и др. [5, 10].

Так, например, при строительстве причала на реке Саравак в Малайзии [10] проводилось предварительное уплотнение грунтов, представленных илами толщиной слоя до 20 м с показателем текучести $IL = 0,7$ и влажностью $W = 60\%$, сдвиговой прочностью 10 кН/м^2 . В основной части территории, расположенной в 40 м от берега реки, уплотнение илов производилось с применением пригрузочной насыпи высотой 3 м и вертикальных ленточных дрен по треугольной сетке с шагом 1,5 м и длиной 26 м. Непосредственно в зоне берега реки в связи с тем что коэффициент устойчивости грунтов основания в случае применения пригрузочной насыпи соответствовал значению, равному 1,0, уплотнение илов производилось с применением мембранного метода вакуумирования [10]. Уплотнение грунтов методом вакуумирования производилось при давлении вакуума 65 кПа. Через 2 месяца вакуумирования была достигнута степень консолидации толщи илов $U \approx 75\%$ при принятой в проекте величине 70%, а осадка поверхности грунта в среднем составила 0,6 м. Значение сдвиговой прочности илов после уплотнения увеличилось с 10 до 14 кН/м². При этом в основной

части территории проектная степень консолидации толщи илов в случае устройства пригрузочной насыпи с вертикальными ленточными дренами была достигнута спустя 12 месяцев, а осадка составила 0,5 м [10].

Таким образом, применение метода вакуумирования для уплотнения толщи илистых грунтов на рассматриваемом объекте позволило достигнуть проектного значения степени консолидации в более короткие сроки, чем уплотнение с помощью пригрузочной насыпи. Авторами статьи [10] делается вывод о том, что в случае возможности потери устойчивости грунтов основания применению других методов уплотнения, например, с пригрузочной насыпью, становится достаточно трудоемким и продолжительным процессом.

В отечественной практике строительства метод вакуумирования для предпостроечного уплотнения слабых водонасыщенных грунтов до настоящего времени не применялся. Однако следует отметить, что в начале 90-х годов в НИИОСП им. Н. М. Герсеванова проводилась серия лабораторных экспериментов по исследованию повышения несущей способности свай методом вакуумирования грунта в околосвайном пространстве [12]. В результате экспериментов был отмечен положительный эффект от вакуумирования в части уплотнения водонасыщенного глинистого грунта и повышения несущей способности модели вакуумной сваи.

Заключение

Предпостроечное уплотнение слабых водонасыщенных органических и органоминеральных грунтов методом вакуумирования применяется при строительстве крупных объектов в разных странах мира, особенно в Европе, США, Китае, Японии и некоторых других азиатских странах. В свою очередь, на территории России отсутствуют известные случаи применения метода вакуумирования для предпостроечного уплотнения слабых грунтов основания; при этом, как правило, применяются классические методы уплотнения с устройством пригрузочной насыпи и вертикальных ленточных и песчаных дрен.

Однако из предварительного обзора мировой практики применения метода вакуумирования видно, что использование указанного метода снижает риск потери устойчивости слабых грунтов основания при устройстве пригрузочной насыпи, сокращает сроки консолидации и в некоторых случаях может иметь преимущество перед другими методами в отношении технико-экономических показателей.

Рассматриваемый метод представляет научный и практический интерес в отношении возможности его эффективного применения в грунтовых условиях на территории России, с целью развития нормативно-технической базы и последующего внедрения в отечественную практику строительства в части предпостроечного уплотнения слабых водонасыщенных грунтов.

Библиографический список

1. *Зехниев Ф. Ф.* Стабилизация оснований с плоскими вертикальными песчаными дренами: дисс. ... канд. техн. наук; Всесоюз. н.-и. проектно-изыскат. и конструкторско-технол. ин-т оснований и подземных сооружений им. Н. М. Герсеванова. — М., 1988.
2. *Bergado D.T., Saowapakpiboon J., Kovittayanon N., de Zwart T.P.* BeauDrain-S PVD vacuum system in soft Bangkok clay: a case study of the Suvarnabhumi airport project. Lowland Technology International 10(1). June 2008.
3. *Dam T. K. L., Sandanbata I., Kimura M.* Vacuum consolidation method – worldwide practice and the latest Improvement in Japan. // Technical Research Report of Hazama Corporation, ISSN: 1880-2370, Vol. 38, 1–14. 2006.
4. *Elgamal A.W., Adalier K.* Soil stabilization by ambient pore pressure and geomembrane containment. / Geosynthetics International. January 1996.
5. *Indraratna B.* Recent advances in the application of vertical drains and vacuum preloading in soft soil stabilization. / Australian Geomechanics Society - EH Davis Memorial Lecture 2009.
6. *Griffin H., O'Kelly B.C.* Ground improvement by vacuum consolidation — a review. // Proceedings of the Institution of Civil Engineers Ground Improvement 167(4):274 – 290. November 2014.
7. *Kjellman W.* Consolidation of clay soil by means of atmospheric pressure. // Proceeding of Conference on Soil Stabilization, Cambridge, Mass., 258-263. 1952.
8. *Rujikiatkamjorn C., Indraratna B.* Application of vacuum consolidation for sustainable transport infrastructure. / 2nd International Conference on Sustainable Built Environment. pp. 1-12. 2012.
9. *Teerachaikulpanich N., Kosaka T.* High pressure for vacuum consolidation method using air-water separation system. / Ground Improvement Case Histories Embankments with Special Reference to Consolidation and Other Physical Methods, 293–314. 2015.
10. *Yee K., Ooi T.A., Ting W.H.* Vacuum consolidation technology for soft soils treatment: principles and field experiences. / Proceedings of the Malaysian Geotechnical Conference, Kuala Lumpur, Malaysia. 16-18 March 2004.
11. *Yu L., Djunaidy M.* A vacuum consolidation method application case for improving dredging slurry. URL: <http://geotekindo.com>.
12. *Коновалов П.А., Бреднев А.В., Труфанов А.Н., Финтушал А.Я.* Повышение несущей способности свай методом вакуумирования грунта в околосвайном пространстве. // Труды ВНИИОСП, вып. №49, 1990. С. 18-26.

Авторы:

Фаршед Фарходович ЗЕХНИЕВ, канд. техн. наук, доцент, член-корр. Академии архитектуры и строительства Таджикистана, почетный строитель РФ, заведующий лабораторией оснований и фундаментов на слабых грунтах НИИОСП им. Н. М. Герсеванова АО «НИЦ «Строительство», Москва

Farshed ZEKHNIEV, Ph.D. in Engineering, Associate Professor, Corresponding Member of the Academy of Architecture and Construction of Tajikistan, Honorary Builder of the Russian Federation, head of the Laboratory of bases and foundations on the soft soils, NIIOSP named after N. M. Gersevanov JSC Research Center of Construction, Moscow
e-mail: farshedzehni@yandex.ru

Дмитрий Алексеевич ВНУКОВ, старший научный сотрудник лаборатории оснований и фундаментов на слабых грунтах НИИОСП им. Н. М. Герсеванова АО «НИЦ «Строительство», Москва

Dmitriy VNUKOV, senior researcher, Laboratory of bases and foundations on the soft soils, NIIOSP named after N. M. Gersevanov JSC Research Center of Construction, Moscow
e-mail: lab2@bk.ru

Анна Владимировна САЗОНОВА, инженер лаборатории оснований и фундаментов на слабых грунтах НИИОСП им. Н. М. Герсеванова АО «НИЦ «Строительство», Москва

Anna SAZONOVA, engineer, Laboratory of bases and foundations on the soft soils, NIIOSP named after N. M. Gersevanov JSC Research Center of Construction, Moscow
e-mail: lab2@bk.ru