

УДК 624.138.21:624.131.23

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ УПЛОТНЕНИЯ СЛАБЫХ ВОДОНАСЫЩЕННЫХ ЛЕССОВЫХ ГРУНТОВ ВЕРТИКАЛЬНЫМИ ПЕСЧАНЫМИ ДРЕНАМИ

Р.А. Усманов

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет

Приводятся результаты полевых (натурных) экспериментальных исследований по изучению особенностей уплотнения толщи грунтов, сложенных слабыми водонасыщенными лессовыми грунтами, с применением вертикальных песчаных дрен в сейсмически активных районах республики Таджикистан.

Ключевые слова:

Лёссовый грунт, вертикальные песчаные дрены, деформационные свойства грунтов.

Широкое развитие поливного земледелия, сооружение мелиоративных и ирригационных сетей, поднятие уровня подземных вод и влияние других природных и техногенных факторов в Центрально-азиатских республиках приводят к обводнению больших массивов ранее маловлажных лессовых просадочных грунтов. При водонасыщении прочностные и деформационные свойства грунтов резко ухудшаются и, как правило, в естественном состоянии они не могут быть использованы в качестве основания зданий и сооружений.

Одним из эффективных методов предпостроечного уплотнения слабых водонасыщенных лессовых грунтов, особенно при большой их толщине (более $H=15$ м) и консистенции $I_L \geq 1,0$, является использование вертикальных песчаных дрен с последующей огрузкой территории весом насыпи или другими материалами, полезная нагрузка от которых равна или превышает нагрузку от проектируемого сооружения [1, 2].

Устройство вертикальных песчаных дрен состоит из следующих операций. Металлическую трубу с закрытым наконечником погружают вибратором, вибромолотом или другими механизмами в толщу слабого грунта на заданную глубину. Затем через боковое отверстие в верхней части трубы в неё отдельными порциями засыпают песок так, чтобы заполнить трубу на высоту 2...4 м. После этого включают вибратор или вибромолот и трубу поднимают на 2...3 м. В скважине остаётся столб песка. Затем в обсадную трубу засыпают следующую порцию песка (тоже на высоту 3...4 м) и снова поднимают трубу. При этом длина трубы должна превышать длину вертикальной дрены не менее чем на два метра. Устроенные таким образом дрены совместно с песчаной подушкой при нагружении толщи грунтов весом пригрузочной насыпи или сооружения, способствуют относительно быстрому отжатию воды из массива грунта и их уплотнению [1].

В то же время в НИИОСП им. Н.М. Герсеева был предложен и апробирован в грунтовых условиях Западной Сибири принципиально новый способ устройства дрен в слабых водонасыщенных грунтах, в том числе заторфованных [3]. Технология устройства указанных песчаных дрен приведена на рис. 1.

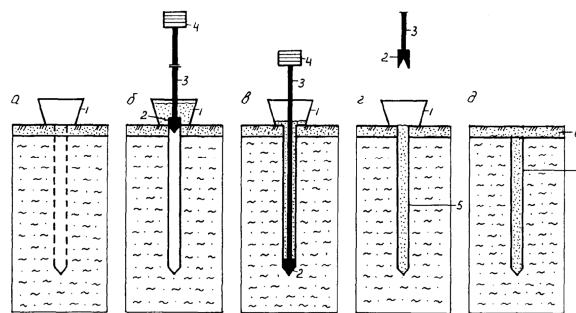


Рис. 1. Технологическая схема изготовления самоформирующихся вертикальных песчаных дрен: а – подготовка территории; б – установка оборудования; в – погружение инвентарного наконечника; г – извлечение наконечника; д – оформление песчаной дрены. 1) приемный бункер, 2) инвентарный наконечник, 3) погружающая штанга, 4) погружающий механизм, 5) песчаная дрена, 6) песчаная подушка

Сущность способа заключается в том, что при устройстве песчаных дрен совмещается процесс образования скважины и ее заполнение материалом (песком). При этом на поверхность основания устанавливается приемный бункер с отверстием на дне, соответствующим диаметру будущей песчаной дрены. В отверстие устанавливается наконечник, конструкция которого может быть выполнена в виде теряемых (оставляемых в грунте) и инвентарных (извлекаемых) элементов, а съемные наконечники различных диаметров позволяют выбрать наиболее экономичное решение в зависимости от инженерно-геологических условий площадки строительства. К наконечнику прикрепляется погружающая штанга (нами были использованы буровые штанги станка УГБ-50), верхний конец которой закрепляется с оголовником погружающего механизма (дизель-молот, вибромолот, вибропогружатель и др.). Затем в приемный бункер подается крупнозернистый песок, который насыщается водой, и затем производится погружение наконечника в слабый грунт. Песок самотеком поступает в образовавшуюся полость, предохраняя тем самым обрушение стенок скважины. Вследствие небольшой площади боковой поверхности наконечника, соприкасающегося с грунтом, силы трения о грунт при погружении весьма малы, что позволяет использовать

легкое и мобильное погружающее оборудование при минимальных затратах.

Следует отметить, что указанная технология устройства вертикальных песчаных дрен универсальна, позволяет изготавливать дренажи практически любого диаметра и формы поперечного сечения. При ее применении не требуется использования специального оборудования и исключается потребность в обсадных трубах, что является очень важным фактором для условий республики Таджикистан, где практически отсутствует какое-либо оборудование для устройства вертикальных песчаных дрен по традиционной технологии.

Опыт проектирования и строительства в различных странах показал высокую эффективность применения вертикальных песчаных дрен для уплотнения оснований, сложенных сильносжимаемыми водонасыщенными грунтами. Этот метод перспективен в грунтовых условиях республики Таджикистан, т. к. позволяет повысить прочностные показатели грунтов, что является немаловажным фактором в условиях высокой сейсмической активности региона. Однако, отсутствие каких-либо экспериментальных исследований по изучению особенностей работы вертикальных песчаных дрен и закономерностей уплотнения слабых водонасыщенных лессовых грунтов при их использовании ограничивает применение этого метода в практике строительства. Поэтому, проведенные нами исследования были направлены на разработку эффективной технологии устройства указанных дрен и выявление эффективности их работы в сложных инженерно-геологических условиях республики.

Комплексные исследования были проведены на специально подготовленной экспериментальной площадке, расположенной в 25 км от г. Душанбе. Физико-механические свойства грунтов площадки приведены в таблице. Уровень подземных вод (УПВ) на участке расположен на глубине 1,5 м от дневной поверхности, ниже которой на глубину более 16 м грунты представлены водонасыщенными суглинками текучепластичной консистенции ($I_L=0,79$).

С целью определения несущей способности и деформационных характеристик грунтов экспериментальной площадки до их уплотнения песчаными дренами были проведены статические испытания по стандартной методике с помощью круглых жестких штампов площадью $A=10^4 \text{ см}^2$ ($D_{\text{ш}}=1,13 \text{ м}$), которые были установлены в котловане непосредственно на отметке УПВ. По результатам испытаний расчетное сопротивление грунтов основания не превышало 80...90 кПа, а модуль деформации грун-

тов составил $E=2,0...2,7 \text{ МПа}$. Для изучения фильтрационных и консолидационных показателей грунтов в лабораторных условиях был определен коэффициент консолидации по методу Тейлора. При величинах нормальных давлений $p=25, 50$ и 75 кПа коэффициенты консолидации соответственно составили $C_v=5 \cdot 10^{-3}$, $12 \cdot 10^{-3}$ и $22 \cdot 10^{-3} \text{ см}^2/\text{с}$.

На экспериментальном участке был вырыт котлован размером $10 \times 30 \text{ м}$ до отметки УПВ, на дно которого затем был отсыпан слой крупнозернистого отмытого песка толщиной $0,5 \text{ м}$. Подготовленная площадка была разделена на 3 отдельные части размерами $10 \times 10 \text{ м}$ каждая (рис. 2). Для изучения эффективности и возможности сопоставления результатов исследований первый участок был погружен весом насыпи без устройства песчаных дрен в основании. Во втором участке были устроены песчаные дренажи по сетке $2,0 \times 2,0 \text{ м}$, а в третьем участке – по сетке $3,0 \times 3,0 \text{ м}$ (рис. 2). Вертикальные песчаные дренажи были устроены на глубину $H=6,0 \text{ м}$ от дна котлована с помощью инвентарных круглых самораскрывающихся наконечников диаметром $D=400 \text{ мм}$ (рис. 2) в соответствии с технологией, приведенной на рис. 1. Для измерения общих осадок и послойных перемещений толщи слабых грунтов по глубине все участки были оборудованы специальными конструкциями поверхностных и глубинных марок. Схема размещения марок приведена на рис. 2, а их конструкций на рис. 3. Глубинные марки были установлены через каждые $1,5 \text{ м}$ до глубины $6,0 \text{ м}$. Контроль за перемещениями всех марок осуществлялся с помощью нивелирования относительно двух неподвижных реперов, расположенных на расстоянии $35...40 \text{ м}$ от опытного котлована.

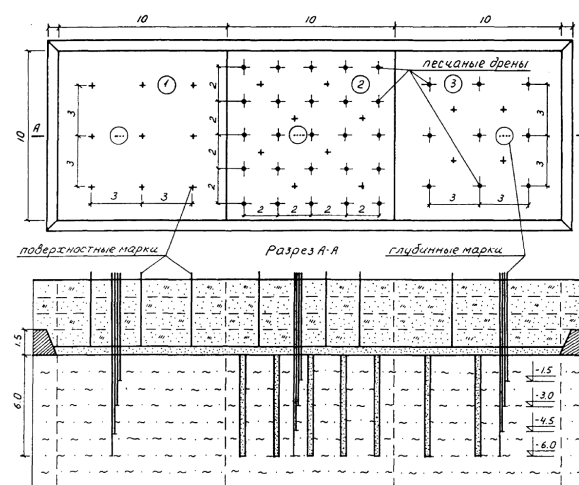


Рис. 2. Схема и продольный разрез экспериментального участка

Таблица. Основные характеристики грунтов экспериментальной площадки

Глубина взятия образца	Природ. плотн. грунта ρ , т/м ³	Плотн. сухого грунта ρ_d , т/м ³	Влажность W , %	Степ. влажности S_r	Пористость n , %	Коэфф. пористости, e	Число пластичности I_p	Показ. текучести I_L	Модуль деформации E , МПа
Выше УПВ	1,79...1,85	1,49...1,53	20...21	0,67...0,75	44...43	0,798...0,752	0,10...0,09	0,26...0,38	8,0...5,5
Ниже УПВ	1,93	1,54	25	0,91	42	0,740	0,08	0,79	2,0

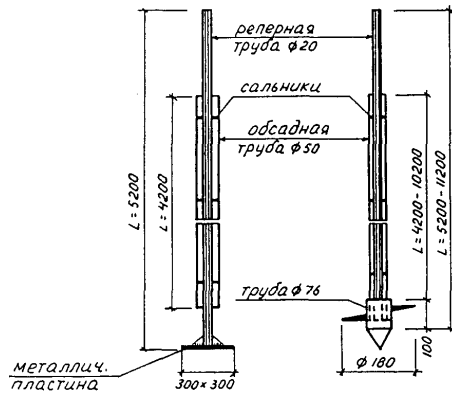


Рис. 3. Конструкции поверхностной и глубинной марок

Огрузка экспериментальных участков производилась путем отсыпки щебня слоями по 1,0 м каждая (ступенями по $p=18$ кПа) с выдержкой каждой ступени до условной стабилизации деформаций, принятой за 1,0 мм/сут. Для изучения эффективности уплотнения водонасыщенных лессовых грунтов песчаными дренами после завершения работ предусматривалось исследование физико-механических свойств уплотненных грунтов в лабораторных и полевых условиях, а также проведение статических испытаний с помощью штампов. Кроме того, были проведены исследования по выявлению особенностей работы песчаных дрен при сейсмических (сейсмозрывных) воздействиях.

Перед началом огрузки территории были про nivelированы все поверхностные и глубинные марки относительно неподвижных реперов. Огрузка территории была произведена послойно весом насыпи согласно вышеприведенной методике, в качестве которого были использованы гравийно-галечниковый и суглинистый грунты плотностью $\rho=1,8$ т/м³. Общая нагрузка на основание от веса насыпи составила $p=75$ кПа (рис. 4).

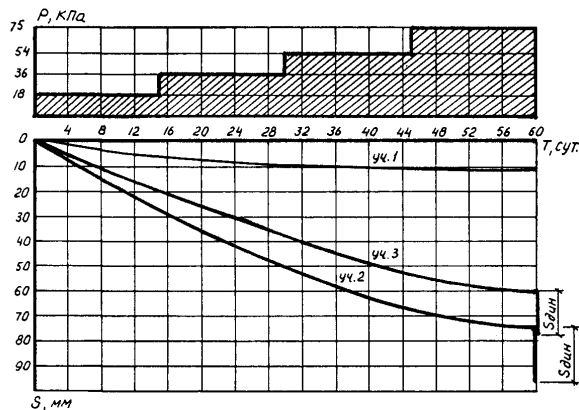


Рис. 4. Развитие осадок экспериментальных участков во времени

На рис. 4 обобщены зависимость осадки основания S от действующего давления p и времени уплотнения T , которые свидетельствуют о высоком эффекте применения вертикальных песчаных дрен для уплотнения оснований, сложенных слабыми водонасыщенными лессовыми грунтами даже при неболь-

ших величинах действующих давлений. При этом наибольшие деформации приходятся на участок № 2, где песчаные дренаи расположены по сетке 2,0×2,0 м. Достаточно хороший эффект уплотнения также получен при устройстве дрен по сетке 3,0×3,0 м.

Результатами наблюдений было установлено, что основная часть деформаций происходит в первые 5–6 дней после приложения каждой ступени нагрузки. Большой интерес представляет характер развития послойных деформаций грунтов по глубине основания (рис. 5). Анализ эпюры послойных перемещений на участке № 2 свидетельствует о том, что основная часть деформаций грунтовой толщи происходит на глубине до –3,0 м, где зафиксировано более 70 % общей осадки грунтовой толщи (рис. 5). При этом на глубине –1,5 м были зафиксированы более 50 % их величины, а глубинная марка, расположенная на отметке –6,0 м, практически не перемещалась. Очевидно, это обстоятельство связано с недостаточной величиной действующего давления, а также и с тем, что по глубине основания увеличивается структурная прочность сжатия грунтов.

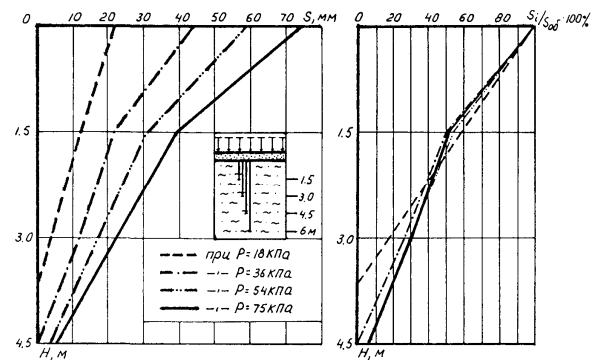


Рис. 5. Развитие послойных и относительных перемещений по глубине

После завершения исследований по уплотнению лессовых водонасыщенных грунтов песчаными дренами, на участках №№ 2 и 3 были проведены статические испытания грунтов с помощью металлических жестких круглых штампов площадью $A=1,0$ м². Испытания проводились одновременным нагружением двух штампов, расположенных на расстоянии не менее $L=5D_{ш}$ (где $D_{ш}=113$ см – диаметр штампа) друг от друга, через металлическую загрузочную платформу при помощи железобетонных тарированных блоков ступенями по $p=25...50$ кПа. Каждая ступень выдерживалась до достижения условной стабилизации осадок, принятой равным 0,1 мм за 2 ч наблюдений. Результаты испытаний обобщены на рис. 6. Для сравнения полученных результатов на этом же графике приведены результаты испытания грунтов основания до их уплотнения песчаными дренами. Как видно, после уплотнения значения расчетного сопротивления грунтов участка составляют 200...250 кПа, что в 2,2...2,8 раз превышает эти значения до их уплотнения. Испытаниями также было установлено повышение значения модуля деформации уплотненных грунтов до 2,4 раза. Результаты статического зон-

дирования уплотненных грунтов показали, что значение угла внутреннего трения грунтов практически не изменилось, а значение удельного сцепления увеличилось в 1,6...2,0 раза.

Следует отметить, что после завершения экспериментальных исследований по уплотнению слабых грунтов при действии статических нагрузок, также были проведены исследования особенностей работы песчаных дрен при сейсмических воздействиях на уплотняемую толщу грунтов. Имитация сейсмического воздействия была осуществлена с помощью короткозамедленных камуфлетных взрывов зарядов взрывчатого вещества, расположенных на определенной глубине и расстоянии от испытываемого участка.

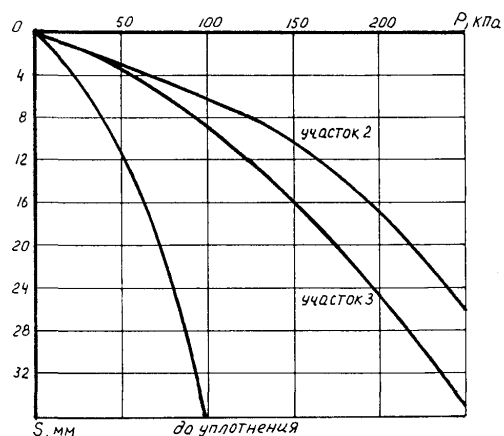


Рис. 6. Зависимость осадок штампов от нагрузки

Результаты испытаний приведены на рис. 4. При сейсмозрывных воздействиях было установлено развитие дополнительных деформаций толщи уплотненного грунта (около 30 % от общей ос-

адки). Очевидно, это обстоятельство связано с повышением давления в поровой воде, что приводит к ускорению и дополнительному её отжатию в тело песчаных дрен.

Проведенные исследования позволяют сделать следующие выводы:

1. Установлена возможность и эффективность применения самоформирующихся вертикальных песчаных дрен для предпостроечного уплотнения слабых водонасыщенных лессовых грунтов в условиях республики Таджикистан. Исползованная технология устройства дрен весьма проста в изготовлении, не требует использования сложного оборудования и позволяет существенно сократить время уплотнения толщи грунтов.
2. Экспериментальные исследования показали, что наибольший эффект уплотнения достигается при устройстве дрен по сетке 2×2 м и менее. Основная часть деформаций происходит в верхней части грунтовой толщи, в пределах 0,5 высоты дрен. Динамические (сейсмические) воздействия приводят к дополнительному уплотнению толщи лессовых водонасыщенных грунтов.
3. После уплотнения лессовых водонасыщенных грунтов вертикальными песчаными дренами и огрузки территории расчетное сопротивление грунтов основания увеличилось более чем в 2 раза, модуль деформации до 2,4 раза, удельное сцепление в 1,6...2,0 раза.
4. В дальнейшем рекомендуется провести экспериментальные исследования при различной глубине и форме песчаных дрен, а также величине действующего давления не менее 150...200 кПа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абелев М.Ю. Строительство промышленных и гражданских зданий на слабых водонасыщенных грунтах. — М.: Стройиздат, 1983. — 248 с.
2. Рекомендации по предпостроечному уплотнению слабых грунтов временной нагрузкой с применением песчаных и бумажных дрен. — Ярославль, 1978. — 22 с.

3. Коновалов П.А. Устройство фундаментов на заторфованных грунтах. — М.: Стройиздат, 1980. — 161 с.

Поступила 12.02.2008 г.