

## СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ

УДК [624.154.04:624.156.04]:624.131.213

### МОДЕЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ ВЕРТИКАЛЬНЫХ АРМОДРЕНИРУЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ ДЛЯ УЛУЧШЕНИЯ СЛАБЫХ ГЛИНИСТЫХ ГРУНТОВ В ГОРОДЕ МИНСКЕ

*канд. техн. наук, доц. В.А. СЕРНОВ; Т.В. ТРОНДА*  
(Белорусский национальный технический университет, Минск)

*Анализируется проблема, возникающая в последнее время при строительстве новых зданий и сооружений, которая выражается в том, что под строительство часто выделяются площадки с неблагоприятными инженерно-геологическими условиями, связанными с залеганием у поверхности слабых водонасыщенных глинистых грунтов. Уплотнение таких грунтов практически невозможно без предварительного осушения. В качестве одного из наиболее эффективных способов упрочнения водонасыщенных глинистых грунтов рассматривается устройство геомассива из вертикальных армодренирующих элементов из сухих бетонных или цементно-песчаных смесей в выштампованных скважинах. Приведены результаты исследований моделей геомассивов из забивных свай и армодренирующих элементов из песчано-цементных смесей, выполнен сравнительный анализ данных технологий, представлены зависимости коэффициента упрочнения основания от длины армирующих и армодренирующих элементов. Установлено, что применение армодренирующих элементов для усиления основания до двух раз эффективнее применения забивных свай. Рассмотрен опыт использования такой технологии для усиления основания при строительстве жилого дома в Минске.*

**Ключевые слова:** *слабые глинистые грунты, вертикальные армодренирующие элементы, сухая бетонная смесь, улучшение свойств грунтов.*

**Введение.** Все чаще при строительстве новых зданий и сооружений в городе Минске и Минском районе выделяются площадки с неблагоприятными инженерно-геологическими условиями, связанными с залеганием у поверхности слабых водонасыщенных глинистых грунтов, нередко подстилаемых мергелями, биогенными или заторфованными грунтами, мощность которых может достигать нескольких десятков метров. В таких случаях традиционно применяются свайные фундаменты, выполняется замена верхнего слоя основания грунтовой подушкой или производится уплотнение природного грунта. Однако, как показывает практика, эти способы малоэффективны в данных грунтовых условиях. Несущая способность относительно коротких, защемленных в слабых глинистых грунтах свай будет незначительна. При устройстве длинных свай-стоек, опирающихся на прочные подстилающие слои, возникает опасность развития сил отрицательного трения вдоль стволов свай, что значительно снижает их несущую способность. При изготовлении набивных свай в таких условиях потребуются дополнительные мероприятия по сохранению целостности стволов при бетонировании. Устройство грунтовых подушек будет также нецелесообразно из-за их значительной толщины, сложности производства работ в обводненных грунтах и возможности размокания подстилающего основания водами, которые будут скапливаться в подушке во время эксплуатации здания. Уплотнение большой толщи водонасыщенных глинистых грунтов тяжелыми трамбовками невозможно без предварительного их осушения. Один из эффективных способов уплотнения таких грунтов – длительное воздействие на них статической нагрузкой с одновременным их дренированием песчаными сваями. Однако этот способ применяется в основном для сооружений, передающих относительно небольшие нагрузки на основание (дорожные насыпи, резервуары и т.п.). Однако уплотняющее давление должно на 20% превышать давление на основание в период эксплуатации и, как следствие, для многоэтажных и высотных зданий применение этого метода затруднительно из-за больших объемов земляных работ при устройстве и разборке насыпей, а также длительного срока консолидации основания.

Одним из методов, позволяющих в настоящее время эффективно выполнить упрочнение большой толщи слабых водонасыщенных глинистых грунтов, служит устройство геомассива, состоящего из вертикальных армодренирующих элементов из сухих песчано-цементных или бетонных смесей, выполненных в выштампованных скважинах. Такой подход позволяет уменьшить влажность основания с последующим его уплотнением цилиндрическими и коническими пуансонами.

Анализ отечественных и зарубежных исследований показал, что до настоящего времени в строительной практике армодрирующие элементы из сухих песчано-цементных или бетонных смесей, выполненных в выштампованных скважинах, не применялись и, соответственно, отсутствуют какие-либо рекомендации и методики расчета таких конструкций. Однако идея упрочнения оснований и создания геомассивов из вибронабивных песчаных свай возникла давно. Впервые этот метод был предложен инженером Спиридоновым еще в 1851 году. Идея заключалась в вытрамбовке скважины деревянным сердечником с последующим заполнением ее песком с послойным уплотнением. В дальнейшем этот метод был усовершенствован в НИИ оснований Госстроя СССР под руководством профессора Д.Д. Баркана, который предложил вместо сердечника погружать в грунт инвентарную стальную трубу, оборудованную снизу раскрывающимся наконечником [1]. Метод глубинного уплотнения грунтов песчаными сваями широко используется и в настоящее время [2], но несмотря на его эффективность, особенно возросшую с развитием строительной техники и оборудования в последние десятилетия, этот метод не нашел дальнейшего широкого применения из-за присущих ему существенных недостатков. В период строительства песчаные сваи, являясь одновременно дренами, осушают глинистое основание и способствуют его упрочнению, но во время эксплуатации вода через дренаи может размочить глинистые грунты и привести к снижению их прочности. Именно по этой причине Н.В. Лалетин [1] рекомендовал не применять данный метод для уплотнения легко размокаемых лессовидных грунтов.

В отличие от песчаных свай, армодрирующие элементы из сухих бетонных и цементно-песчаных смесей более эффективно осушают окружающие грунты. В результате гидратации цемента прочность таких элементов значительно выше, чем прочность песчаных свай, а деформативность и водопроницаемость, соответственно, ниже. После твердения цемента эти элементы, в отличие от песчаных свай, больше не являются дренами и, как следствие, не возникает опасность размокания глинистых грунтов в период эксплуатации здания.

Впервые сухие бетонные смеси предложил применять профессор М.И. Никитенко для увеличения несущей способности набивных свай в водонасыщенных глинистых грунтах. При устройстве буронабивных свай в основании жилого дома в квартале улиц Бурдейного – Якубовского и конических выштампованных свай в основании жилого дома по улице Бельского влажность глинистых грунтов оказалась значительно выше, чем по данным инженерно-геологических изысканий. Статические испытания опытных свай показали, что их несущая способность недостаточна для восприятия проектных нагрузок. Для уменьшения влажности грунтов основания было принято решение в уровне нижних концов свай втрамбовать сухую бетонную смесь, что позволило увеличить их несущую способность примерно в 2 раза [3]. В дальнейшем подобный подход успешно применялся под руководством М.И. Никитенко для увеличения несущей способности набивных свай при строительстве жилого дома в квартале улиц Притыцкого – Бельского, православного храма во имя Архистратига Божия Михаила в микрорайоне Сухарево [4] и многоэтажного здания по улице Тимирязева [5].

Успешный опыт применения сухих бетонных смесей для создания уширенных свай в слабых водонасыщенных глинистых грунтах позволил предположить возможность улучшения свойств грунта во всей активной зоне основания здания путем устройства геомассива. Для оценки эффективности закрепления глинистых грунтов армодрирующими элементами из сухих бетонных и песчано-цементных смесей были выполнены модельные и натурные испытания фрагментов геомассива.

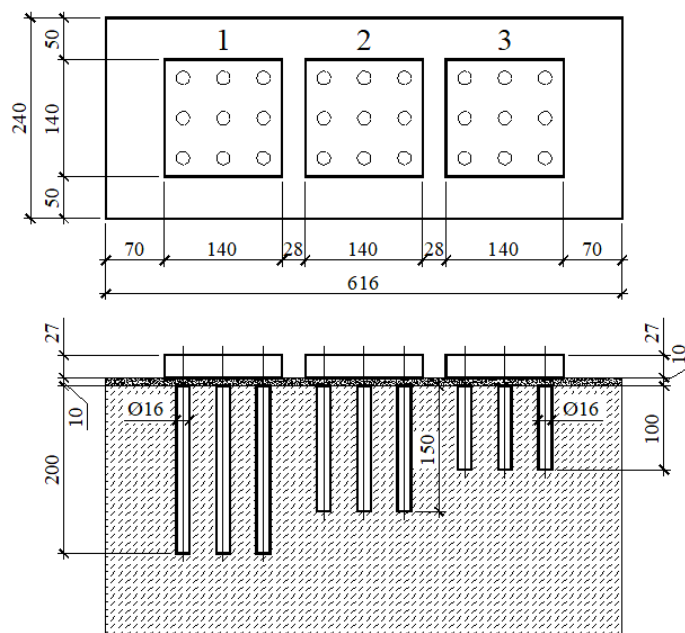
#### **Модельные испытания**

Исследования моделей геомассивов проводились в лаборатории кафедры «Геотехника и экология в строительстве». При устройстве армодрирующих элементов в выштампованных скважинах усиление основания происходит как за счет уплотнения и армирования основания, так и за счет увеличения прочности глинистого грунта в процессе его дренирования. Вопросы армирования грунтов посвящено достаточно большое количество исследований. По данной теме опубликованы работы Р.А. Мангушева [6], Л.В. Нуждина [7], А.П. Кремнева [8], С.Н. Банникова [9]. Однако процесс увеличения прочности глинистого грунта при его дренировании до настоящего времени недостаточно изучен. Цель модельных исследований – качественная оценка влияния эффектов армирования и дренирования на изменение деформационных свойств слабых глинистых оснований при устройстве армодрирующих элементов из сухой цементно-песчаной смеси.

Испытания моделей проводились в грунтовом лотке размерами 1120×240×600 мм, заполненном слабой водонасыщенной супесью со следующими характеристиками:

- влажность на границе текучести  $W_L = 15,7\%$ ;
- влажность на границе раскатывания  $W_p = 9,1\%$ ;
- начальная влажность  $W_0 = 13,7\%$ ;
- число пластичности  $I_p = 6,6$ ;
- показатель текучести  $I_L = 0,70$ .

Для оценки деформационных свойств основания в лотке были выполнены испытания шести штампов размерами 140×140×27 мм статической нагрузкой. После этого в местах установки первых трех штампов было выполнено упрочнение основания армирующими элементами в виде деревянных забивных свай диаметром 16 мм, длиной 100 мм, 150 и 200 мм, с шагом  $a = 3d = 48$  мм. Основание остальных трех штампов было закреплено армодрирующими элементами из сухой цементно-песчаной смеси на портландцементе марки ПЦ 500 с соотношением цемента к песку по массе Ц:П = 1:9,1. Соотношение компонентов бетонной смеси бралось из расчета получения бетона класса С8/10 в стандартных условиях. Размеры армодрирующих элементов, выполненных в выштампованных скважинах, были такие же, как и размеры забивных свай на первых трех участках. Схема расположения элементов приведена на рисунке 1. Армирующие и армодрирующие элементы устанавливались с шагом  $a = 3d$  в количестве 9-ти штук под каждым штампом.



модель 1 :  $l_{эл} = 20$  см; модель 2:  $l_{эл} = 15$  см; модель 3 :  $l_{эл} = 10$  см

Рисунок 1. – Схема расположения моделей геомассива

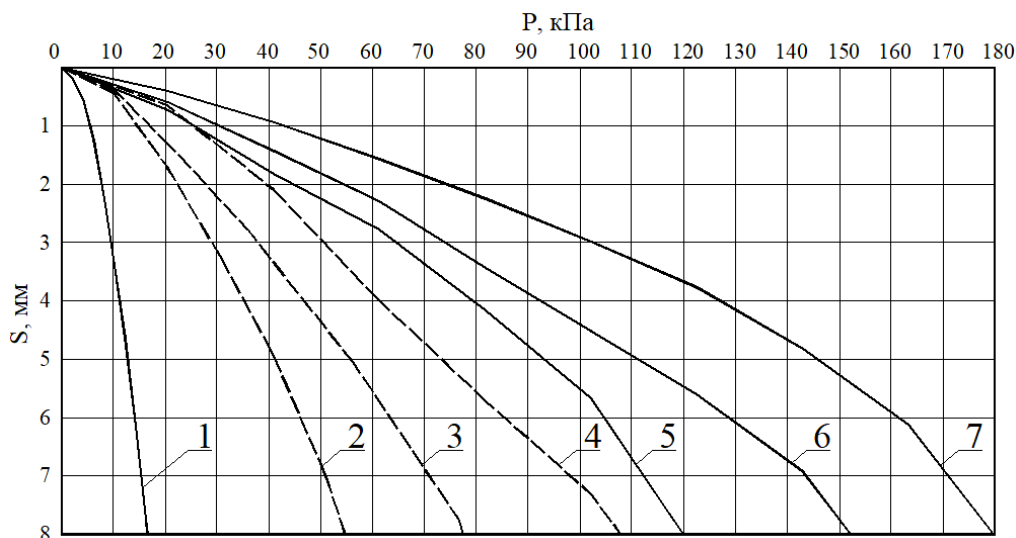
На первых трех участках армирующие элементы забивались последовательно без технологических перерывов. На остальных трех участках армодрирующие элементы выполнялись в два этапа. На первом этапе под каждым штампом было выполнено по 5 элементов (центральный и угловые). Затем по истечении трех суток были установлены оставшиеся 4 элемента. Такой подход позволяет добиться максимального эффекта уплотнения, поскольку элементы второй очереди погружались в частично дренированный грунт.

После устройства армирующих и армодрирующих элементов над ними была изготовлена распределительная песчаная подушка толщиной 10 мм из песка средней крупности с диаметром частиц менее 2 мм. В ходе проведения эксперимента применялись мероприятия по предотвращению испарения влаги и высыхания грунта.

По истечении 28 суток после устройства армодрирующих элементов и набором ими прочности были проведены штамповые испытания всех шести моделей геомассива. Нагрузка к штампам прикладывалась ступенями с шагом 0,2...0,4 кН с помощью рычага с передаточным числом 1:10. Для измерения осадок штампов на каждой из них было установлено по два индикатора часового типа ИЧ-10 с ценой деления 0,01 мм. Всего было выполнено три испытания штампом грунта, армированного забивными сваями, и три испытания грунта, армированного сухой цементно-песчаной смесью в выштампованных скважинах. При этом варьировалась длина армирующих и армодрирующих элементов соответственно 100 мм, 150 и 200 мм. Результаты испытаний отображены на рисунке 2.

Несущая способность моделей фундаментов определялась при осадке  $s = 8$  мм, соответствующей осадке штампа до армирования грунта на предпоследней ступени загрузки, после которой происходит потеря устойчивости основания. Результаты испытаний показывают, что армирование грунта забивными

сваями позволяет эффективно повышать несущую способность основания. Так, при устройстве в основании штампов 9 армирующих элементов из выштампованных свай длиной 100 мм, 150 и 200 мм несущая способность основания возросла соответственно на 230%, 370 и 550%. Еще эффективнее несущая способность основания возрастает при устройстве армодренирующих элементов из сухой цементно-песчаной смеси. Изготовив такие элементы в основании оставшихся трех штампов по описанной выше технологии длиной 100 мм, 150 и 200 мм, удалось увеличить несущую способность основания соответственно на 622%, 818 и 982%.



1 – штамп; 2 – армирующие элементы  $L = 100$  мм; 3 – армирующие элементы  $L = 150$  мм; 4 – армирующие элементы  $L = 200$  мм; 5 – армодренирующие элементы  $L = 100$  мм; 6 – армодренирующие элементы  $L = 150$  мм; 7 – армодренирующие элементы  $L = 200$  мм

Рисунок 2. – Результаты испытаний фрагментов геомассивов, состоящих из армирующих и армодренирующих элементов

Для оценки эффективности армирования и дренирования грунта удобно пользоваться коэффициентом упрочнения  $K_{упр}$ , равным отношению несущих способностей закрепленного грунта и грунта в естественном состоянии. На рисунке 3 представлены графики зависимости коэффициента упрочнения от длины свай  $K_{упр} = f(L)$ .

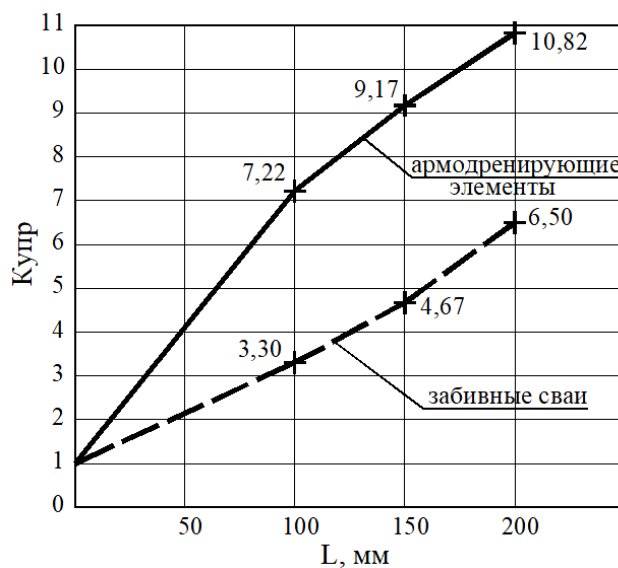


Рисунок 3. – Зависимости коэффициента упрочнения от длины элементов

Сопоставив графики зависимости  $K_{\text{упр}} = f(L)$  для армирующих и армодрирующих элементов, можно заметить, что в результате армирования грунта значение  $K_{\text{упр}}$  возрастает пропорционально увеличению длины свай, а эффект дренирования практически не зависит от длины элементов.

#### **Практическое применение армодрирующих элементов**

Установленная в ходе модельных исследований высокая эффективность применения армодрирующих элементов при закреплении слабых водонасыщенных оснований позволила применить подобное решение при проектировании жилого дома № 16 по улице Ложинской в жилом комплексе «Вивальди» в Минске, представляющем собой С-образное одиннадцати подъездное здание высотой 11–14 этажей (рисунок 4). Каркас здания состоит из железобетонных монолитных колонн и диафрагм жесткости с монолитными плитами перекрытия. Здание разделено температурно-деформационными швами на три секции: первая в осях 8–12 (4 подъезда), вторая в осях 5–8 (3 подъезда), третья в осях 1–5 (4 подъезда).



**Рисунок 4. – Жилой дом № 16 по улице Ложинской**

По данным инженерно-геологических изысканий, выполненных ООО «Геоплюс» в 2009 году (объект 216/08), в основании жилого дома № 16 по улице Ложинской в Минске залегают большие толщи слабых глинистых грунтов, в том числе с органическими включениями, мелом и мергелем общей мощностью до 33,3 м. На рисунке 5 приведены характерные инженерно-геологический разрезы строительной площадки с вписанными элементами усиления основания.

В верхней части основания под почвенно-растительным слоем залегают насыпные грунты (ИГЭ-1), представленные преимущественно песками с прослоями глинистых грунтов, строительным мусором и растительными остатками. Насыпные грунты распространяются до глубины 2,1...4,9 м и подлежат замене грунтовыми подушками. Ниже расположен комплекс аллювиальных, озерных и болотных отложений, образованных переслаивающимися песками разной крупности (ИГЭ-6–14), супесями и суглинками с содержанием органических веществ до 10% (ИГЭ-2–4), а также мергелем с содержанием органических веществ до 36,6% и заторфованных грунтов с содержанием карбонатов до 25% (ИГЭ-5). Грунтовые воды, вскрытые всеми скважинами на глубинах 7,8...33,4 м, приурочены к слоям песчаных грунтов. Верховодка и воды спорадического распространения вскрыты с глубин 3,2...4,1 м, имеют сезонный характер. Осложняющими фактором при устройстве фундамента, кроме низких прочностных и деформационных свойств грунтов (ИГЭ-2, 3, 4 и 5), является также сложное геологическое строение площадки, характеризующееся значительной неоднородностью основания как в плане, так и по глубине (рисунок 5).

На стадии проектирования рассматривались несколько вариантов устройства основания: сплошное свайное поле; замена слабых грунтов в верхней части основания грунтовой подушкой; геомассив из армодрирующих элементов.

Технико-экономическое сравнение вариантов показало неэффективность применения буронабивных свай, длина которых должна была достигнуть 30...35 метров. В связи с возможностью возникновения отрицательных сил трения вдоль боковых поверхностей свай при прохождении их сквозь большие

толщи заторфованных глинистых грунтов и мергелей их расчетная несущая способность оказалась незначительна. Учитывая также большую стоимость и технологические проблемы при устройстве свай такой длины, вариант свайного поля был признан нецелесообразным в данных грунтовых условиях. Также неэффективным оказался вариант устройства грунтовой подушки, толщина которой должна быть не менее 12 м, а глубина котлована достигла бы 15 м. Кроме больших объемов земляных работ и транспортных расходов, имели место проблемы водоотведения и уплотнения подушки вибродинамическими методами на основаниях, сложенных водонасыщенными грунтами, обладающими тиксотропными свойствами. В связи с этим окончательно было принято решение о закреплении слабых грунтов в пределах сжимаемой толщи основания фундаментных плит вертикальными армодренами из сухих бетонных смесей.

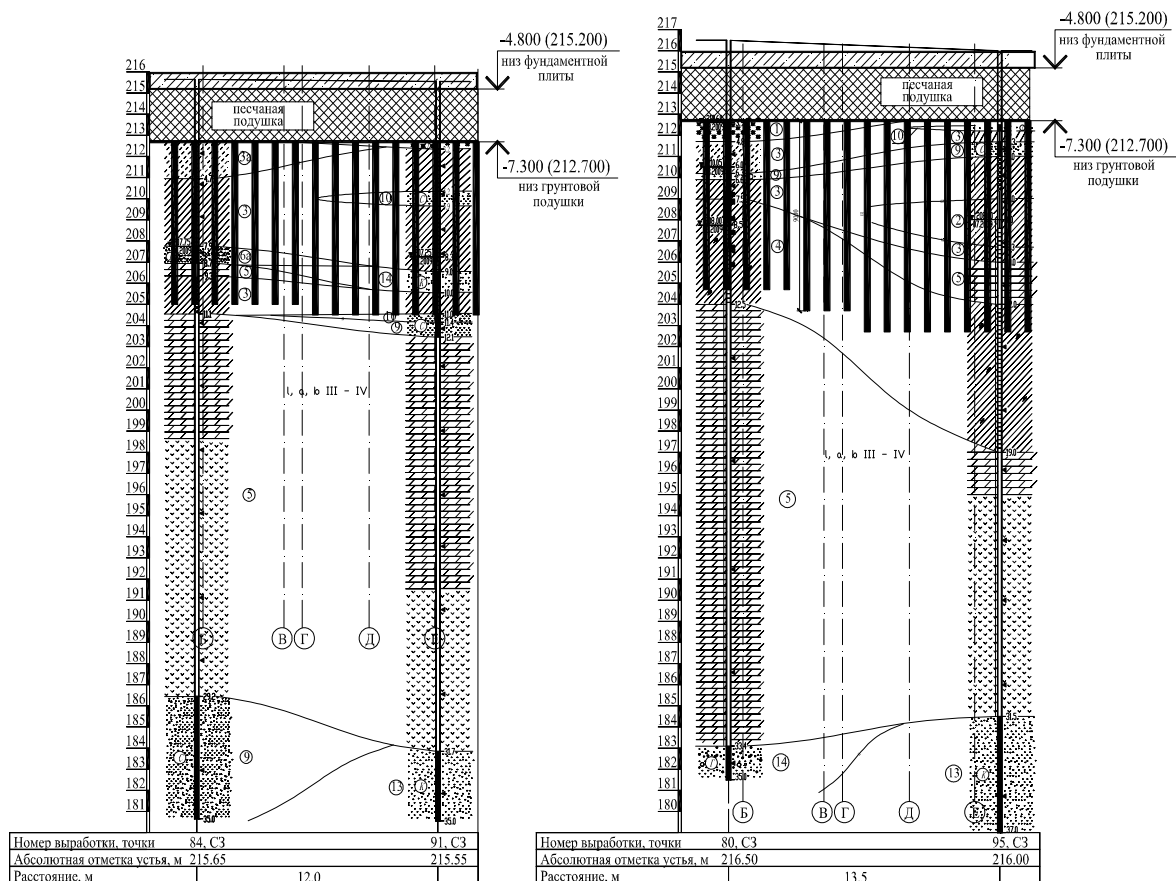


Рисунок 5. – Характерные инженерно-геологические разрезы строительной площадки со вписанными элементами геомассива

Технология изготовления цилиндрических вертикальных армодренамирующих элементов (ВАДЭ) состоит в устройстве выштампованных скважин с последующим заполнением их сухой бетонной смесью, соответствующей классу бетона С8/10. Скважина выполняется путем погружения в грунт металлической трубы диаметром 325 мм с теряемым наконечником, выполненным из листовой стали толщиной 10...12 мм. Наконечник крепится в трубе с помощью приваренных к нему скоб, выполненных из арматуры диаметром 12 мм. Погружение трубы на проектную отметку производится вибратором. После чего в трубу через воронку засыпается сухая бетонная смесь. Труба извлекается из скважины с помощью подъемного оборудования с включенным вибратором, что позволяет уплотнить бетонную смесь в скважине.

Армодренамирующие элементы выполнялись в котловане с отметки на 2,5 м ниже подошвы фундаментной плиты по сетке 1000×1000 мм. Длина ВАДЭ принималась таким образом, чтобы их нижние концы опирались на относительно прочные грунты, либо располагались глубже нижней границы сжимаемой толщи грунта в основании фундаментной плиты.

Упрочнение грунтов выполнялось как в основании фундаментной плиты, так и за ее контурами на расстоянии 4,5...6 м. После устройства ВАДЭ выше их оголовков выполнялась армированная грунтовая подушка высотой 2,5 м. С целью более эффективного рассеивания напряжений в верхней части основания грунтовая подушка армировалась горизонтальными металлическими стержнями, которые раскла-

дывались в обоих направлениях с шагом 1000 мм на трех уровнях: на глубинах 700 мм, 1300 и 1900 мм от подошвы фундаментной плиты (рисунок 6).

Строительные работы производились в 3 очереди: первая в осях 8-12 (4 подъезда); вторая – в осях 4-8 (3 подъезда); третья – в осях 1-4 (4 подъезда).

Для повышения эффективности уплотнения основания армодренирующие элементы выполнялись в две очереди – захватками «через один». Таким образом, элементы второй очереди устраивались в частично дренированном грунте через неделю после изготовления элементов первой очереди. Всего на площадке было выполнено 7009 ВАДЭ длиной от 3 до 12 метров. При наличии в основании прослоек грунтов прочных и средней прочности (ИГЭ-3, 9, 10, 14) длина ВАДЭ принималась таким образом, чтобы их нижние концы находились в этих грунтах. В противном случае длина ВАДЭ принималась не менее глубины сжимаемой толщи грунта в основании фундаментных плит здания.

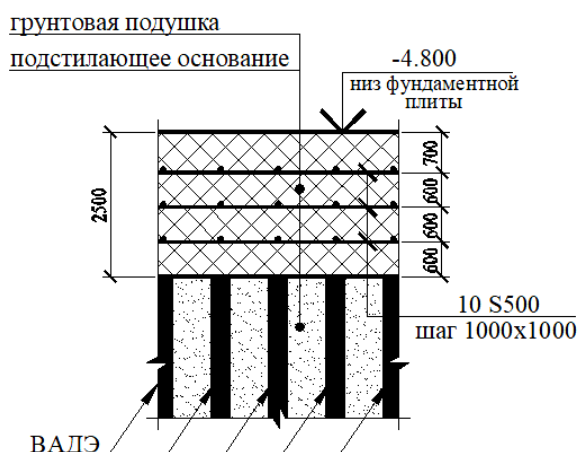


Рисунок 6. – Схема армирования основания

Поскольку подобная методика закрепления грунтов ранее не применялась в строительной практике, особое внимание уделялось натурным испытаниям фрагментов геомассивов статическими нагрузками и зондированию грунтов. После устройства армодренирующих элементов сопротивление грунта под наконечником зонда возросло в среднем на 85% [10]. По результатам испытаний фрагментов геомассивов железобетонным штампом площадью 4 м<sup>2</sup> модуль деформации закрепленного массива грунта составил не менее 34 МПа. Для наблюдения за осадками здания были установлены стеновые реперы. По данным наблюдений осадка здания не превысила 50 мм, что в 3 раза меньше допускаемых значений.

**Заключение.** Уплотнение сильно увлажненных и водонасыщенных глинистых грунтов невозможно выполнить без их дренирования. В связи с этим армирование таких грунтов бетонными или металлическими элементами малоэффективно, поскольку физико-механические свойства самих грунтов при этом не улучшаются. Исследования моделей геомассивов показали, что модуль деформации основания, усиленного армодренирующими элементами из сухих бетонных смесей в выштампованных скважинах, до двух раз выше, чем у оснований, армированных обычными забивными сваями. Сухая бетонная смесь, поглощая воду из окружающего грунта, позволяет ему уплотняться более эффективно.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Лалетин, Н.В. Основания и фундаменты / Н.В. Лалетин. – М. : Высш. школа, 1970. – 352 с.
2. Справочник геотехника. Основания, фундаменты и подземные сооружения. – 2-е изд. ; под общ. ред. В.А. Ильичева и Р.А. Мангушева. – М. : Изд-во АСВ, 2016. – 1040 с.
3. Никитенко, М.И. Несущая способность буронабивных свай с уширениями / М.И. Никитенко, В.В. Роговенко, В.А. Сернов // Вестн. БНТУ. – Минск, 2002. – № 6. – С. 23–27.
4. Сернов, В.А. Экспериментальные исследования свайно-плитных фундаментов из коротких конических свай на строительных площадках г. Минска / В.А. Сернов // Наука и техника. – Минск, 2015. – № 2. – С. 66–72.
5. Никитенко, М.И. Некоторые проблемы свайных фундаментов в геотехнической практике Беларуси / М.И. Никитенко, В.Ю. Журавский // Строительная наука и техника. – Минск, 2008. – № 4(19). – С. 44–51.

6. Методы подготовки и устройства искусственных оснований : учеб. пособие / Р.А. Мангушев [и др.]. – М. – СПб. : Изд-в АСВ, 2012. – 280 с.
7. Нуждин, Л.В. Усиление оснований фундаментов армированием вертикальными элементами / Л.В. Нуждин, В.В. Теслицкий // Будаўніцтва – Строительство – Construction. – Минск, 2003. – № 1-2. – С. 43-47.
8. Кремнев, А.П. Методика расчета оснований, усиленных вертикально ориентированной арматурой с учетом дилатансии / А.П. Кремнев, А.Н. Поляков // Будаўніцтва – Строительство – Construction. – Минск, 2003. – № 1-2. – С. 185-189.
9. Банников, С.Н. Расчет осадок оснований и сооружений из армированного грунта / С.Н. Банников // Геотехника Беларуси: наука и практика : сб. тр. междунар. науч.-техн. конф. – Минск : БНТУ, 2013. Ч. 1. – С. 156–165.
10. Сернов, В.А. Опыт применения геомассива при строительстве жилого дома в г. Минске / В.А. Сернов, Т.В. Тронда // VII Дулатовские чтения : материалы междунар. науч.-практ. конф., Тараз, 29-30 марта 2012 г. / Таразский гос. ун-т им. М.Х. Дулати. – Тараз, 2012. – С. 222–224.

Поступила 04.12.2019

#### MODEL RESEARCHES AND PRACTICAL APPLICATION OF VERTICAL REINFORCING-DRAINING ELEMENTS FOR IMPROVEMENT OF SOFT CLAY SOILS IN MINSK

V. SERNOV, T. TRONDA

*Construction sites with unfavorable geotechnical conditions associated with the occurrence of soft water-saturated clayey soils at the ground surface are often given under construction of new buildings and structures in recent years. Compaction of such soils is practically impossible without prior drainage. One of the most effective ways of strengthening water-saturated clay soils is the installation of vertical reinforcing- draining elements of dry concrete or cement-sand mixtures in stamped wells. The study results of driven pile models and reinforcing-draining elements of sand-cement mixture, the comparative analysis of these technologies, the dependence of the ground compaction coefficient on the length of reinforcing and reinforcing-draining elements are given in the article. It was found that the application of reinforcing-draining elements to strengthen the ground base is up to two times more effective than the application of driven piles. The experience of application such technology to strengthen the ground base during the construction of a residential building in Minsk is also considered in the article.*

**Keywords:** soft clay soils, vertical reinforcing-draining elements, dry concrete, ground improvement.