В.Р. Мустакимов

**ИССЛЕДОВАНИЕ СТЕСНЕННОЙ
ПРОСАДКИ АРМИРОВАННЫХ
ВЕРТИКАЛЬНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ
ПРОСАДОЧНЫХ ГРУНТОВЫХ
ОСНОВАНИЙ**

Монография

Казань, 2018

УДК 624.0

ББК 38.2

Мустакимов В.Р.

Исследование стесненной просадки армированных вертикальными элементами просадочных грунтовых оснований: Монография / В.Р. Мустакимов. – Казань, 2018. – 48 с.

ISBN: 978-5-6042088-8-5

SPLN: 001-000001-5329-MK

DOI: 10.18411/978-5-6042088-8-5

idsp: sbonline-978-5-6042088-8-5

В настоящем научном издании приведены результаты научно-теоретических и экспериментально-практических исследований автора по актуальным проблемам расчета и проектирования геомассивов сформированных в результате вертикального армирования просадочных грунтов. На основании лабораторных и полевых исследований автора и других отечественных и зарубежных ученых, разработана научно-теоретическая расчетная модель структурного геомассива, армированного вертикальными элементами в просадочном грунте и составлен алгоритм последовательного расчета инженерными методами.

Научное издание (монография) предназначено для учениых, специалистов, магистров, аспирантов и молодых ученых, работающих в области исследований, проектировании и строительстве зданий и сооружений на просадочных грунтах.

Рецензенты:

Доктор технических наук,
заместитель генерального директора
по научной работе ГУП «Татинвестгражданпроект»
И.С. Абдрахманов

Кандидат технических наук, доцент,
заведующий кафедрой «Архитектура»
Казанского Государственного
архитектурно-строительного университета
А.О. Попов

УДК 624.0

ББК 38.2

ISBN: 978-5-6042088-8-5

SPLN: 001-000001-5329-MK

DOI: 10.18411/978-5-6042088-8-5

idsp: sbonline-978-5-6042088-8-5

© Казанский Государственный архитектурно-строительный университет, 2018

© В.Р. Мустакимов, 2018

© Оформление. Ijornal , 2018

Предисловие

В современных условиях отечественного и зарубежного промышленного и гражданского строительства зданий и сооружений, армирование грунтов оснований широко используется при строительстве объектов на структурно-неустойчивых грунтах, например, лессовых просадочных, слабых и сильносжимаемых водонасыщенных, рыхлых песчаных и насыпных грунтах. Необходимость в нем часто возникает при строительстве на техногенно-измененных территориях. Основными задачами армирования грунтовых оснований являются: устранение просадочности лессовых грунтов; упрочнение и повышение устойчивости оснований, в том числе на оползнеопасных склонах; упрочнение и укрепление насыпей и откосов земляных сооружений, армирование обратных засыпок подпорных стен и повышение устойчивости подпорных стен; исключение выпора грунта из-под сооружений. Армирование оснований – это мероприятия и технологии, предназначенные для усиления и упрочнения грунтовых массивов с помощью включения в их состав специальных элементов, находящихся в тесном взаимодействии с грунтом, но не связанных с фундаментом конструктивно. Усиление и упрочнение дисперсной среды грунтового основания можно осуществить за счет введения в толщу грунтового массива элементов повышенной прочности, которые хорошо работают на сжатие или растяжение и имеют высокое сцепление и трение с окружающим грунтом. В грунтовых массивах конструктивное расположение армирующих элементов может быть вертикальным, горизонтальным, наклонным в одном направлении, наклонным в двух и более направлениях, прерывистым и в виде различного ряда ячеистых структур. В зависимости от физико-механических характеристик грунтов и задач, которые решаются при армировании, выбирается характер расположения армирующих элементов и технология их выполнения. Технология выполнения армирования оснований в значительной степени зависит от характера основания и особенностей напластований грунтов. Для армирования оснований может эффективно использоваться технология устройства армированных элементов с применением буросмесительной технологии и высоконапорных инъекций (струйной геотехнологии), которые позволяют выполнить армирование грунтового массива в зоне армоземелентов и без нарушения естественной структуры грунта в основном массиве. Буросмесительная технология армирования грунтов – это механическое разбуривание вертикальных или наклонных столбов без выемки грунта из шурфов с одновременным перемешиванием нарезанного грунта с цементным молоком. В основе струйной геотехнологии лежит использование энергии водоцементной струи для прорезания в грунте щелей или вертикальных столбов, заполняемых твердеющими цементогрунтовыми материалами. Струйная геотехнология позволяет выполнить армирующие элементы с различным расположением и различной формы, в том числе в виде сплошных стенок, отдельных столбов, опор корневидной формы, горизонтальных элементов, а также в форме ячеистых структур сложной формы. Технологические приемы и методы устройства вертикальных армирующих элементов путем низконапорного инъецирования (без нарушения существующей структуры грунта) крепящих растворов для закрепления грунтов силикатизацией, смолизацией или другими химическими материалами, несмотря на их дороговизну, также находят широкое применение при армировании, упрочнении и укреплении грунтов оснований, усилении откосов и стабилизации оползнеопасных склонов. Конструктивные элементы, сопрягаемые друг с другом, позволяют выполнять ячеистые структуры, которые могут быть использованы для упрочнения основания, укрепления откосов, насыпей и подпорных сооружений. Благодаря таким структурам грунт, находящийся в ячейках, вовлекается в работу. Вопросы вовлечения в совместную работу армоземелентов и окружающего их просадочного грунта изучены недостаточно. Поэтому настоящая работа посвящена научно-теоретическим и экспериментально-практическим исследованиям стесненной просадки.

Автор

Введение

Работы по возведению фундаментов и подземных сооружений в общем объеме строительно-монтажных работ в стране занимают 7-15% сметной стоимости строительства, 10-20% затрат труда, 15-20% общей продолжительности работ по возведению зданий и сооружений, 20-25% общего расхода бетона в строительстве [1 - 4]. В свою очередь, в пределах приблизительно 15% территории России и ближнего зарубежья имеются отложения лессовых грунтов, которые обладают просадочными свойствами и залегают непосредственно под растительным слоем. Лессовые породы широко распространены среди континентальных четвертичных отложений. На территории СНГ лессовые породы занимают площадь равную 3,3 миллиона квадратных километров. Это составляет около 14% ее континентальной поверхности, из них примерно 35% площади европейской части и около 7% -азиатской. На Украине они охватывают свыше 70% всей территории. По данным Мавлянова, лессовыми и лессовидными породами заняты более 25% общей территории центральной и южной частей Средней Азии, а также значительная площадь в западной части Западно-Сибирской низменности [52]. Возведение и реконструкция надежных фундаментов и подземных сооружений на просадочных и других структурно-неустойчивых и слабых грунтах вызывает необходимость дополнительных стоимостных и материально-технических затрат. Поэтому использование местных грунтов, упрочненных или закрепленных вяжущими, по эффективным технологиям, имеет большое практическое значение.

При повышении плотности застроенных территорий, реконструкции и создании современных инфраструктур в стесненных условиях, возникают сложности связанные с тем, что многие работы производятся на лессовых просадочных грунтах, распространенных на значительной части, территории Российской Федерации и стран СНГ. Решить эти проблемы можно лишь при использовании таких методов искусственного улучшения грунтов оснований, при которых не возникают динамические воздействия на грунты основания и фундаменты существующих зданий от механического и статического уплотнения. Химические инъекционные методы позволяют решить имеющиеся проблемы. Однако, относительно высокая стоимость и дефицитность химических реагентов, зависимость инъекционных способов от коэффициента фильтрации « k_f », степени водонасыщенности « S_r » а также от минералогического состава закрепляемого массива грунта, не позволяет применять их, как основные строительные мероприятия, в широком масштабе. Поэтому поиск новых технологических приемов, методов и способов, удовлетворяющих всем условиям строительства зданий на просадочных породах вблизи от существующих сооружений, в том числе при реконструкции, является актуальным.

Одним из таких, способов, сочетающим в себе элементы физико-химического и конструктивного улучшения строительных свойств лессовых просадочных пород, является – их армирование вертикальными, наклонными и горизонтальными элементами, изготовленными современными способами, включая: бурсмесительный, струйный, инъекционный, термический, комбинированный. Среди отмеченных наиболее приемлемыми и практикуемыми в стесненных условиях являются: бурсмесительный способ изготовления цементогрунтовых армоэлементов и способ «струйной геотехнологии» (струйная цементация), основанные на смешении просадочных пород с водоцементным раствором непосредственно в массиве грунта. В России, вертикальное армирование грунтов, как способ их упрочнения, начал применяться для закрепления илов уже в начале 70-х годов, а с 1980 года распространен и на просадочные породы. Следует отметить работы: В. М. Безрука [19], И. Д. Бройда [21], А. И. Ветштейна [24], Л. В. Гончаровой [26], В. А. Гупаленко [28], Ф. А. Грачева [29], А. Л. Исакова [37], В. И. Крутова [42], А. А., Кузнецова, Л. В. Нуждина [48], Я. Я. Мотузова [57], В. Р. Мустакимова [60...71], А. Г. Малинина [72, 91], И. К. Попсуенко [80], А. П. Ручьева [82], Б. С. Смолина [90], А. Н. Токин [94, 95, 98], А. В. Ша-

пошников [122], В. Г. Федоровский, С. Г. Безволев [120], К. Ш. Шадунц [121].

Перспективность вертикального армирования структурно-неустойчивого грунтового массива, заключается в следующем: полной или частичной ликвидации просадочных свойств грунтов оснований зданий и сооружений при капитальном строительстве, а также, что очень важно, в условиях реконструкции при стесненных условиях; возможности полной механизации работ по устройству вертикальных цементогрунтовых армоэлементов; независимости от коэффициента фильтрации « k_f », степени водонасыщения « S_r », активности поглощающего комплекса закрепляемого грунта; снижении объема земляных работ и расхода привозных строительных материалов; сокращении сроков возведения « T » и стоимости строительства « C_c ».

Глава 1. Общие сведения

1.1. Особенности и строительные свойства лессовых просадочных пород и способы строительства на них

Изучением лессовых пород занимались видные русские ученые Л.С.Берг, И.П.Герасимов, К.И.Лисицын, В.А.Обручев, А.П.Павлов, Б.Б.Полынов, П.А.Тутковский, И.И.Трофимов и др., создавшие ряд научных теорий о происхождении этих пород включая: эоловую, водно-ледниковую, пролювиальную, делювиальную, аллювиальную, почвенно-аллювиальную и др. Среди них, распространение получили: эоловая, водно-ледниковая и пролювиальная гипотезы. Однако единого мнения о происхождении лессовых просадочных пород нет, несмотря на ряд выше предложенных теорий.

В связи с интенсивным строительством в районах распространения лессовых пород в нашей стране проводятся систематические, фундаментальные исследования лессовых грунтов, строительные свойства которых, необходимо знать для обоснованного строительства промышленных, гражданских, транспортных и гидротехнических зданий и сооружений. Необходимо отметить работы: Ю. М. Абелева, М. Ю. Абелева [1], М. Я. Денисова [31], Н. И. Кригера [40, 41], Г. А. Мавлянова [52], М. Н. Гольштейна [25], А. К. Ларионова [49], В. П. Ананьева [4, 5], В. И. Крутова [43], Е. М. Сергеева [86], Е. А. Сорочана [87, 89], И. В. Попова [79], К. И. Лукашева [50], В. С. Быкова [14], А. А. Мустафаева [58], А. А. Мусаэляна [53], Э. В. Кадырова [44], Л. Г. Балаева [13] и других исследователей.

Лессовые породы обладают рядом специфических особенностей, что определяется структурой этих грунтов. Структура зависит от условий генезиса лессовых пород, процессов диагенезиса и эпигенезиса. Специфические свойства лессовых пород в основном определяются: крупными вертикально расположенными порами и каналами, растительного и животного происхождения; способность держаться вертикальными обрывами значительной высоты в открытых местах, подвергающихся действию атмосферных осадков; быстрая размокаемость в воде; отсутствие мелкой слоистости; светлая окраска в сухом состоянии. Именно, макропористая структура, по мнению Ю. М. Абелева [1], существенно определяет деформационные, прочностные и фильтрационные свойства лессовых пород.

Количество вертикальных макропор существенно определяют анизотропию свойств лессовых пород. По данным Ю. М. Абелева и М. Ю. Абелева, коэффициент фильтрации лессовых пород в вертикальном направлении равен $(3 \div 6) \cdot 10^{-6}$ см/сек, а в горизонтальном направлении коэффициент фильтрации для этих же лессовых пород города Ташкента оказался равным $(1 \div 8) \cdot 10^{-8}$ см/сек.

Особенность лессовых пород состоит в том, что при водонасыщении и даже при увеличении влажности существенно увеличиваются их деформационные характеристики и снижаются прочностные (ϕ и c) свойства. Резкое увеличение деформаций лессовых пород под действием постоянной по величине нагрузки, при увлажнении ($W \geq W_{sat}$), названо

просадкой. Просадка лессовых пород представляет собой неравномерные и большие деформации, преимущественно вертикального характера, происходящие вследствие существенного изменения их физико-механических свойств под влиянием воздействия влаги в условиях определенного напряженного состояния. Основными условиями возникновения просадочных деформаций в лессовых породах являются: высокая пористость « n » (более 45%); сравнительно большая, особенно в вертикальном направлении, водопроницаемость, обеспечивающая достаточно быстрое проникновение влаги в глубь толщи; проникновение в грунт воды в количестве, обеспечивающим создание увлажненной зоны с влажностью « W », отвечающей данному виду грунта и его напряженному состоянию; своеобразный гранулометрический состав, характеризующийся преобладанием пылеватых (обычно более 50%) и незначительным содержанием глинистых фракций (до 20%); наличие растворимых в воде солей (хлоридов, сульфатов и карбонатов), покрывающих трубчатые пустоты лессовых пород; а также насыщение кальцием поглощающего комплекса грунта, обуславливающим коагуляцию мелких частиц в агрегаты, способствующие повышению фильтрационных свойств лессовых пород.

Природная влажность W лессовых пород, изменяется в широких пределах от 1 до 39%. При природной влажности W и с ненарушенной структурой, лессовые породы обладают достаточно хорошей несущей способностью. Компрессионные свойства лессовых пород при природной влажности качественно не отличаются от обычных мало сжимаемых связных грунтов. Согласно исследованиям Ф. А. Андрухина, сжимаемость просадочных пород относительно больше, чем непросадочных.

Значительно более прочные структурные связи лессовых пород, обусловленные как водно-коллоидными, так и цементационными связями, маловодостойки, поэтому они так же как мерзлые и илистые, относятся к структурно неустойчивым породам.

Н. Я. Денисов [31], Г. А. Мавлянов [52] и другие исследователи указывали, что при повышении влажности, прочность этих пород, вследствие разрушения структуры, резко снижается. Кроме того, резко снижаются характеристики сопротивления сдвигу. На эти же явления указывают: Н. И. Кригер, Р. С. Зиангиров, В. И. Осипов и другие современные геологи. Одним из первых предложений, объясняющих механизм процесса просадки в лессовых породах, была солевая гипотеза, предложенная Б. Б. Полюновым и С. В. Быстрым. Б. А. Замарин, М. М. Решеткин, А. Г. Глоголев, Г. А. Мавлянов просадочность лессовых пород связывают с высокой пористостью и присутствием в них водорастворимых солей. Согласно исследованиям Ф. И. Воронова, структурная прочность лессовых пород обуславливается в основном гипсом и известью, растворение которых, при увлажнении, приводит к нарушению природной устойчивости толщи породы. Однако, учитывая сравнительно слабую растворимость в воде этих солей, делается заключение, что растворение и вымывание солей из породы влияют на развитие просадочных деформаций по прошествии достаточно больших промежутков времени.

Удельный вес частиц лессовых пород для всех генетических типов равен $\gamma_s = 26,0 \div 27,4 \text{ кН/м}^3$. Удельный вес грунтов « γ » изменяется в больших пределах от 12 до $17,4 \text{ кН/м}^3$. Величина удельного веса лессовых грунтов определяется глубиной расположения исследуемого слоя в толще лессовых пород, возможности замачивания, генезиса и других факторов. Некоторые виды лессовых суглинков, характеризуются способностью к набуханию при замачивании без нагрузки. Величина давления набухания, при невозможности подъема верхнего штампа компрессионного прибора, для суглинков города Джизака, составляет от 0,05 до 0,07 МПа. Величина набухания зависит от начальной пористости породы, его влажности и минералогического состава. Многие лессовые суглинки, которые при замачивании без нагрузки являлись набухающими, после нагружения и замачивания становились просадочными, при этом величина относительной просадочности для лессовых суглинков при вертикальном давлении на образец грунта 0,3 МПа составляла 0,058. Это свидетельствует о том, что склонность лессовых суглинков к набуханию не свидетельствует о

том, что эти грунты непросадочные.

Анализ результатов многочисленных исследований отечественных ученых по изучению количественных характеристик просадочных лессовых пород в различных районах показывает, что для большинства из них характерно постоянное значение величины относительной просадочности $\langle \varepsilon_{sl} \rangle$ на глубину до 10 м. Глубже этой отметки, до глубины $25 \div 40$ м., наблюдается снижение величины $\langle \varepsilon_{sl} \rangle$. С увеличением влажности $\langle W \rangle$ наблюдается равномерное уменьшение величины $\langle \varepsilon_{sl} \rangle$ и начального просадочного давления $\langle P_{sl} \rangle$. Следовательно, грунты, обладающие просадочными свойствами, не могут служить надежным основанием под здания или сооружения без техногенного преобразования их строительных свойств, как при капитальном строительстве, так и в условиях реконструкции. Обеспечение надежности и эксплуатационной пригодности сооружений возводимых и эксплуатируемых на таких грунтах, с помощью различных инженерно-технических мероприятий, приводит к удорожанию строительно-монтажных работ, увеличению расхода материалов и сроков строительства. В настоящее время применяются конструктивные, механические и физико-химические методы, обеспечивающие необходимую надежность зданий и сооружений, возводимых на просадочных и других структурно-неустойчивых породах. В соответствии с [77, 124] классификация методов искусственного улучшения структурно-неустойчивых оснований, включая просадочные, приведена на (рис. 1).

Рис. 1. Классификация методов искусственного улучшения слабых и структурно-неустойчивых оснований

Выбор комплекса эффективных мероприятий в каждом конкретном случае, является важной и сложной задачей. С целью эффективного решения этих задач, автором составлены схемы к расчету просадок грунтов со способами устройства искусственных оснований фундаментов, включая вертикальное армирование, которые представлены на (рис. 2).

Рис. 2. Схемы к расчету просадки грунта S_{sl} с рекомендуемыми автором способами устройства искусственных оснований фундаментов мелкого заложения.

а - просадка грунта $S_{sl,q}$ - отсутствует; *б* - верхняя и нижняя зоны просадки не сливаются; *в* - тоже, сливаются; *г* - просадка от внешней нагрузки - отсутствует; *д* - уплотнение грунтов тяжелыми трамбовками; *е* - грунтовая подушка; *ж* - фундамент в вытрамбованном котловане; *и, о* - закрепление грунта силикатизацией; *к, п* - вертикальное армирование грунта; *л* - уплотнение грунтов тяжелыми трамбовками с силикатизацией или обжигом; *м* - грунтовая подушка с силикатизацией или обжигом; *н* - вытрамбовывание котлована с силикатизацией или обжигом; *р* - глубинное уплотнение (армирование) грунтовыми связями; *с* - глубинное уплотнение просадочного массива с предварительным замачиванием; *т* - упрочнение грунта силикатизацией; *у* - армирование просадочного грунта вертикальными элементами в комплексе с грунтовой подушкой; *ф, ц, ч* - прорезка структурно-неустойчивой толщи массива сваями или армоэлементами, опирающимися на упрочненный грунт; *1* - эпюра $\sigma_{z,q}$; *2* - эпюра $\sigma_z = \sigma_{z,q} + \sigma_{z,p}$; *3* - эпюра изменения P_{sl} по глубине

В условиях реконструкции, наиболее приемлемым методом устранения полной или частичной просадки грунтов является его армирование упрочненными элементами, располагаемые в массив вертикально, горизонтально или наклонно. В последнее время распространение получило вертикальное армирование.

1.2. Концепции армирования грунтовых массивов вертикальными элементами

Создание вертикально расположенных упрочненных элементов в грунтовом массиве или насыпи, придает им повышенную устойчивость и надежность.

Признание в строительстве, это направление получило после опубликования работы французского ученого Анри Видаля, посвященной вопросам создания «армированного грунта». Им же впервые был запатентован новый вид материала «армированный грунт» (армогрунт). Основными достоинствами армогрунта являются: простота, легкость изготовления и низкая стоимость.

На начальном этапе своего развития, армирование грунта в основном использовалось в дорожном и гидротехническом строительстве. В последние годы, концепция об армированном грунте, вызвала широкий интерес и среди специалистов в области промышленного и гражданского строительства. Несмотря на легкость восприятия, эта концепция привлекает внимание множеством новых теоретических и практических задач, требующих своего решения. В настоящее время, в нашей стране и за рубежом проводятся многочисленные исследования по данной проблеме, а армирование грунта признано в качестве отдельного направления в геотехнике со своим кругом вопросов.

Грунтовое основание, армированное вертикально расположенными в массиве, более прочными по отношению к структурной прочности P_{str} грунта армирующими грунтовый массив элементами, представляет собой искусственно улучшенное физико-химическим или конструктивным методом основание, формируемое путем устройства в грунтовой среде относительно жестких элементов.

Нагрузка на вертикально армированное грунтовое основание передается непосредственно через фундамент мелкого заложения. При этом, в контактной зоне, между подошвой фундамента FL и оголовками армоэлементов возможны различные варианты передачи давления, в том числе: посредством непосредственного контакта или через конструктивную прослойку (грунтовую, бетонную, железобетонную или горизонтально армированный грунт).

При передачи нормального давления от фундамента на упрочненное вертикальным армированием грунтовое основание, армирующие элементы, включаясь в совместную работу с окружающим их массивом грунта, снижают деформативность армированной части грунтового массива, взаимодействуя с грунтом по боковой поверхности за счет сил трения-сцепления и по торцам за счет сопротивления грунта, подстилающего армированный массив.

Напряженно-деформированное состояние грунтового основания, армированное вертикальными элементами, принципиально отличается как от естественного основания, так и от свайного фундамента (массива грунта с погруженными в него сваями), непосредственно контактирующими с ростверком.

В известном смысле свайный фундамент можно рассматривать как частный случай армированного вертикальными стержнями основания (геомассива), принимая во внимание тот факт, что прочность материала стальных, железобетонных, бетонных или цементогрунтовых свай-армоэлементов, соответственно, в тысячи, сотни и десятки раз больше чем окружающий их массив грунта. При этом грунт лишь препятствует погружению свай от нагрузки, передаваемой сооружением и деформация грунта происходит лишь под подошвой условного фундамента.

1.3. Становление и развитие концепции армирования грунтов

Армирование грунтов имеет глубокие исторические корни. Как любое перспективное направление в науке, оно находит свое подобие в природных формах и явлениях (логова животных, гнезда птиц, эффект от корневой системы деревьев). Первые упоминания

об армировании глины и кирпичей тростником или соломой при сооружении жилья имеются в Библии, во второй книге Ветхого завета. Известно, что сооружения, возводимые с использованием таких, подсказанных природой приемов, существовали в IV и V тысячелетиях до нашей эры. На (рис. 3) приведены некоторые из сохранившиеся до наших дней сооружений, при возведении которых использовался принцип армирования грунта.

Рис. 3. Древние сооружения из армированного грунта

а – Зиккурат; *б* – Вавилонская башня; *в* – Великая китайская стена; *г* – возведение армированных тростником стен и сооружений в древности; *д* – принципиальная схема армирования грунта при строительстве фортификационных сооружений древними галлами (по К. В. Пресли и С. Сарану); *е* – деревянный причал, сохранившийся в иле р. Темза на протяжении 1200 лет, удерживаемый с помощью армирующих брусьев; *и* – фото разлившейся реки Темза со старой системой деревянного причала из дубовых брусьев высотой 2 метра

Среди таких сооружений можно отметить: Зиккурат древнего города Дур-Куригацу, известного под названием Агар-Каф, высотой до 30м и возведенный более 3000 лет назад [11]; аналогичные строения у г. Ур, завершённое около 2205 г. до нашей эры; святилище Мардука у Вавилона, называемое Вавилонской башней, возведённое около 550 году до н.э. [39], армировались сплетёнными тростниковыми матами. Великая китайская стена, участки которой были завершены приблизительно в 200 году до н.э., представляют собой пример использования армированного грунта в виде смеси глины с гравием, армированной ветвями тамариска [32]. Приёмы армирования грунта тростником использовали и римляне при возведении земляных дамб вдоль Тибра. Причал порта Лондиниума в Лондоне, построенный римлянами в I веке, свидетельствует о том, что методы строительства прошлого имеют сходство с современными методами. В иле реки Темзы найдены сохранившиеся на протяжении 1200 лет участки деревянного причала из дубовых брусьев высотой 2 метра, вертикальная грань которого, удерживалась от бокового давления грунта при помощи деревянных армирующих элементов, заанкеренных в обратную засыпку [18]. Вплоть до последнего столетия, методы армирования грунта были широко распространены при возведении объектов военного назначения. Ещё галлы использовали приёмы армирования грунта при строительстве фортификационных сооружений, где применяли последовательную укладку с чередованием слоев древесины и грунта [33]. В 1822г полковник К. В. Песли внедрил армирование грунта в английской армии [78]. Показавший, что значительное снижение бокового давления на подпорные стенки, достигается при армировании засыпки слоями из хвороста, досок или холста. К аналогичным выводам, через 150 лет пришёл С. Саран [88] исследуя современные обратные засыпки с использованием армированного грунта. Библиографические данные и археологические раскопки

дают основание сделать вывод, что в прошлом, сооружения из армированного грунта применялись для регулирования русел рек вдоль транспортных путей и дамб. Так в долинах рек Тигр и Евфрат обнаружены системы дамб с использованием армирования тростником и глинистым заполнителем значительно более раннего возраста, чем у римлян. Известно использование фашин голландцами и мелиорация болот в Англии, так же как, укрепление берегов реки Миссисипи в Америке [118]. В начале XX века американский инженер Ф. Рид получил патент на армирование конструкций дамб [81], использовавший в качестве армирующих элементов железнодорожные рельсы для армирования каменной наброски по низовой грани плотин в Калифорнии. В 1962 г аналогичный прием, но с использованием стальных сеток, из стержней диаметром 3/4 дюйма, был применен на острове Папуа [119]. Эффективность этого метода была подтверждена в Южной Америке, Мексике и Австралии.

Значительный вклад в развитие концепции возведения сооружений из армированного грунта внес американский ученый А. Манстер [51]. В 1925 году по его проекту возведена грунтовая подпорная стенка, армированная элементами, со скользящими соединениями с облегченной облицовкой. Это позволило свести до минимума осадку обратной засыпки.

Дальнейшее развитие армогрунт получил в разработках Койна (30-е годы) и Лаллемана (1957г). В 1945 г Койн пришел к выводу, что если материал засыпки обладает хорошими характеристиками трения, то армоэлементы сами могут обеспечивать необходимую связь с засыпкой без концевых анкеров. Понимание принципиального механизма поведения армирующих элементов можно отметить в разработках Лаллемана. Для увеличения сцепления с грунтом по длине армоэлемента он устанавливал шипы.

1.4. Современные концепции армирования грунтов

Одна из новых концепций армирования грунта, предложенная Казагранде, сводится к схеме, когда слабый массив грунта армируется высокопрочными элементами и диафрагмами, размещаемыми в грунте [22].

Идея современного представления об армированном грунте была разработана в 60-х годах А. Видалем. Ее суть состояла в создании композитного материала, образуемого размещением в массиве грунта упрочненных элементов обладающих трением на контакте с грунтом. На основе концепции А. Видаля, в 1968г были построены крупные подпорные стенки вблизи от Мэто, на юге Франции. Принципиальные конструктивные решения подпорных стен и удерживающих сооружений, выполняемых из различных материалов с анкерным армированием в массив грунта, приведены на (рис.4).

Рис. 4. Принципиальные схемы сооружений из вертикально и горизонтально армированного грунта.

а – вертикальные армирующие элементы в основании сооружения и в стенах ограждения протяженного котлована с креплением распорками; б – крепление стен глубокого котлована при помощи вертикальных армоэлементов-шпунтов с грунтовыми анкерами; в – подпорная стена из сборных бетонных блоков, удерживаемая в равновесии от действия бокового давления засыпки щебнем, армированным геосинтетическими сетками; г - расчетно-конструктивная схема нагруженной внешней нагрузкой наклонной подпорной стены с горизонтально армированным массивом обратной засыпки со стороны активного давления.

В 1972 г армирование по А. Видалю, было применено, для стабилизации оползня, разрушившего транспортную инфраструктуру и принесшего ощутимые материальные затраты, в штате Калифорния (США). Отдельные фрагменты масштабов разрушительного действия природного процесса оползня, на незакрепленном армированием участке трассы, приведены на (рис. 5).

Рис. 5. Результаты схода разрушительного гигантского оползня в Калифорнии (США)

В 1973 г было завершено первое сооружение из армированного грунта в Великобритании. В 1974 г Калифорнийский департамент транспорта внедрил использование сеток в качестве горизонтальных армирующих элементов подпорных стен с вертикальными армо-элементами-ограждениями [119].

Совершенствование армирования грунтов и грунтовых сооружений непосредственно связано с применяемыми для армирования материалами. В сооружениях раннего периода, для армирования использовались органические материалы: древесина, солома или тростник. Но уже в начале XIX века Песли признавал преимущества, более современных материалов для армирования, в частности, он применял парусину, хотя, она имела ограниченный срок службы.

Лишь современное материаловедение и технический прогресс позволили использовать для армирования грунтов искусственные и техногенные материалы: сетки или полосы из нержавеющей стали, геоткани и геосетки при горизонтальном армировании. А также цементогрунт, известегрунт, силикатогрунт, термически упрочненный грунт, бетон, шлакобетон - при вертикальном и наклонном армировании грунтовых массивов и грунтовых сооружений.

Представляет интерес опыт армирования геосетками территории под аэропортом Ниета (Токио) и повышения несущей способности слабых грунтов оснований зданий и сооружений [125].

В 1981г развитие конструкций из армированного грунта способствовало их использованию при реконструкции и восстановлении обрушившихся откосов выемок на автомагистралях М1 и М2 в Англии [34], где в качестве армирующих элементов были применены сетки из синтетического материала (рис. 6).

Рис. 6. Современные геосинтетические материалы для армирования грунтов.

а – геосетка; б – георешетка; в –раскатка рулона геосинтетического материала при армировании грунта

Современные принципы формирования и армирования грунтовых массивов с использованием геосинтетических материалов в комплексе с вертикальными и наклонными элементами, изготовленными из цементогрунта приведены на (рис. 7).

Рис. 7. Современные сооружения из грунта и грунтовые массивы, укрепленные армированием.

a – дамба армированная горизонтальными и наклонными геосетками; *б* – насыпь из грунта, армированная горизонтальными геосетками и наклонными георешетками; *в* – грунтовой откос с уступами, выполненный из насыпного грунта, армированного горизонтальными сетками с заггибно-прижимными краями; *г* – подпорно-удерживающая стена (габион), выполненная щебня окнотуренного сеткой; *д* – подпорная стена из мелко-размерных элементов с горизонтальным армированием обратной засыпки; *е* – формирование геоячеек из геосеток для армированного массива под сооружение насыпи; *и* – конструктивно-расчетная схема одно-ярусной подпорной стены, удерживаемой в равновесии за счет горизонтального армирования заанкеренного грунт обратной засыпки; *к* – то же, многоярусной подпорной стены; *л* – конструктивно-расчетная схема грунтового откоса, выполненного из насыпного послойно уплотненного грунта, армированного стальными сетками с заггибно-прижимными краями; *м* – схема расположения армирующих сеток в плане, на участке с закруглением; *н* – схема многофункционального комплекса надземных и подземных инженерных сооружений, возведенных на армированном вертикальными элементами грунтовом основании; *п* – котлован с оголовками вертикальных армоэлементов из цементогрунта изготовленных по стрийной геотехнологии.

Современное отечественное и зарубежное развитие техники и технологии в области формирования и возведения надежных грунтовых оснований зданий и сооружений, позволяет значительно расширить возможности строителей при возведении объектов на структурно-неустойчивых грунтах. Важное место среди практикуемых способов упрочнения структурно-неустойчивых грунтовых массивов занимает вертикальное и наклонное армирование различными упрочненными эрмоэлементами, изготавливаемыми, как правило из: железобетонных свай; стальных труб и прокатных профилей; закрепленных инъектированием грунтовых массивов с использованием гидравлических или воздушных вяжущих; термосвай из обожженного грунта; цементогрунтовых столбов-опор, изготовленных по бурсмесительной технологии, струйной, буринъекционной, разрядно-импульсной геотехнологиям и т.д. Для практической реализации отмеченных геотехнических решений применяются различные отечественные и зарубежные машины и механизмы, часть из которых, приведена на (рис. 8).

Рис. 8. Машины и механизмы для изготовления армирующих элементов из цементогрунта и бетона.

a – организационно-технологическая схема по устройству вертикальных армоэлементов из цементогрунта с использованием струйной цементации [94a]; *б* – цементогрунтовые армоэлементы, изготовленные по струйной геотехнологии, где: 1- струя, 2 – струйный кондуктор, 3 – скважина, 4 – направляющее устройство, 5 – грузоподъемный механизм, 6 – компрессор, 7 – водяной насос, 8 – емкость для воды, 9 – насос для раствора, 10 – емкость для раствора, 11 – укрепленное армированием основание; *в* – схема разреза и плана изготовления подземной емкости из вертикальных цементогрунтовых секущихся элементов при помощи струйной геотехнологии; *г* – опытное испытание струйного монитора с промывкой гидросистемы; *д* – рабочий момент армирования основания полотна железной дороги при помощи отечественной буровой установки на шасси ЗИЛ-131; *е* – рабочий момент усиления грунта основания под существующими фундаментами при помощи вертикального и наклонного авримирования грунтового массива в стесненных условиях подвала с использованием мобильной установки; *и* – универсальная мобильная установка для выполнения вертикальных, наклонных и горизонтальных цементогрунтовых армоэлементов по струйной геотехнологии; *к* – рабочий момент опытного изготовления вертикальных армоэлементов из цементогрунта при помощи бурсмесительной технологии с использованием отечественной буровой установки УРБ-2,5А (разработка автора); *л* – бурсмеситель (рабочий орган), изготовленный автором; *м* – конструктивно-технологическая схема вертикального армоэлемента, выполняемого по разрядно-импульсной технологии, где: 1 – ствол сваи после РИО, 2 – штанга с электродами, 3 – генератор импульсных токов, 4 – миксер с бетононасосом, 5 – зона цементации грунта, 6 – зона уплотнения грунтового массива

В современной постановке, под армированием грунтов оснований гражданских и промышленных зданий и сооружений, а также грунтовых сооружений, понимается улучшение физико-механических свойств грунта, служащего основанием, путем устройства в массиве прочных элементов, совместно работающих с окружающим их грунтом и конструктивно не связанных с фундаментами. Практикуемые способы вертикального, горизон-

тального и комбинированного армирования грунтов под фундаментами зданий или сооружений приведены на (рис. 3.18 – 3. 21) в [34]. Расположение армирующих элементов и технология их изготовления, выбирается в зависимости от особенностей физико-механических характеристик грунтов и задач, решаемых при армировании [11, 30, 56, 63, 64, 108]. Наиболее значимые сферы применения современных способов вертикального, наклонного и горизонтального армирования грунтов, включая возведение подземных сооружений с использованием армирования по буросмесительной и струйной геотехнологиям, приведены на (рис. 9).

Рис. 9. Подземные и надземные сооружения, а также усиление фундаментов зданий с использованием принципов вертикального и наклонного армирования по буросмесительной и струйной геотехнологиям. а – фрагмент принципиальной схемы плана комбинированной конструкции многоярусного заглубленного помещения, выполняемая с помощью струйной геотехнологии; б – то же, сечения А-А и В-В, где: 1 – секущие цементогрунтовые элементы $d=800$ мм, формирующие вертикальные стены и сводчатые перекрытия; 2 – буронабивные железобетонные сваи $d=1000$ мм; 3 – песчаные сваи; 4 – наружные стены-ограждения (противофильтрационная завеса), выполненная при помощи струйной геотехнологии; 5 – надежный грунт основания под сооружением; в – подземная емкость; з – укрепление основания дорожного полотна и откоса; д - усиление фундаментов зданий, свода подземного тоннеля и армирование грунта основания под опорой моста; е – армирование грунта сборными железобетонными сваями, опускаемыми под собственным весом в свежеприготовленную смесь из цементогрунта; и - фрагмент ограждения глубокого котлована из вертикальных цементогрунтовых армоэлементов, выполненных по струйной геотехнологии в не однородных по глубине структурно-неустойчивых грунтах; к - то же, в однородных грунтах; л –крепление стен котлована, изготовленное по буросмесительной технологии; м –армирование грунта при усилении

1.5. Геомассив из вертикально армированного структурно-неустойчивого грунта

Для возведения зданий и сооружений на надежных основаниях, продления срока их службы и обеспечения длительной эксплуатационной надежности подземной части, необходимо улучшить качество грунта. Часто здания строятся в сложных инженерно-геологических условиях на структурно-неустойчивых грунтах, и нет возможности использовать сваи в качестве фундамента. Один из методов, который используется в этом случае – «геомассив» или искусственно улучшенное грунтовое основание. В случае, когда строительные свойства основания неудовлетворительны, и устранить проблемы экономически невыгодно или модификацией других компонентов системы является нецелесообразной, устраивается «структурный геомассив». Структурный геомассив – это искусственно улучшенное основание с проектируемыми физико-механическими характеристиками. Для устройства структурного геомассива применяется вертикальное армирование грунтового слоя жесткими элементами, с помощью струйной цементации грунта или бурсмесительной технологии, а также создания поверхностного, гибкого, распределяющего слоя [http://www.new-ground.ru/vidy-rabot/geomassiv.php]. На основании исследований [34, 70, 123] предлагается армирование грунтовых массивов вертикальными, горизонтальными и наклонными элементами из стали, бетона, цементогрунта и геосинтетики (рис. 10).

Рис. 10. Структурные геомассивы создаваемые армированием грунтов цементацией и геосетками. а – с вертикальным расположением армирующих элементов (армоэлементов); б – с наклонным расположением армоэлементов; в – с расположением армоэлементов в двух направлениях; г – армирование массивов в виде ячеек; д – с горизонтальным расположением армоэлементов; е – с горизонтальным прерывистым расположением армоэлементов; 1 – сплошные армоэлементы; 2 – распределительная подушка; 3 – поверхность скольжения массива; 4 – вертикальное ограждение подпорной стенки; 5 – надёжный грунт; 6 – фундамент; 7 – облицовка откоса; 8 – подпорная стенка; 9 – насыпь; 10 – армоэлементы в виде ячеистых структур из секующихся свай (цементогрунтовые армоэлементы ЦГАЭ); 11 – армоэлементы из ячеистых структур, выполненных по струйной технологии; 12 – армоэлементы из сеток и стержней; 13 – прерывистые армоэлементы.

К числу привлекательных принципов формирования структурных геомассивов в современных условиях следует отнести метод термического упрочнения или обжига массива маловлажного структурно-неустойчивого грунта. Термическое закрепление или упрочнение грунтов основано на термической обработке массива связных пород газообразными продуктами горения жидкого или газообразного топлива, сжигаемого у устья скважины или непосредственно в толще грунта. Этот метод применяют для ликвидации просадочных и пучинистых свойств грунтов оснований, укрепления и армирования грунтовых откосов насыпей и выемок, а также устройства фундаментов из обожженного грунта. При этом применяют различные виды топлива: природный газ, соляровое масло или твердое топливо. Основными составными частями термоустановки являются генератор сжатого воздуха и форсунка. Принципиальные схемы возможного армирования грунтов, при помощи обжига маловлажного массива из связных пород, с целью создания упрочненных структурных геомассивов в гражданском, промышленном и сельском строительстве зданий и сооружений, приведены на (рис. 11).

Рис.11. Структурные геомассивы создаваемые армированием массива метода обжига маловлажных грунтов а – конструкция форсунки, где: 1 – запорная игла; 2 – полость подачи воздуха для распыления; 3- полость для охлаждения корпуса форсунки; 4 – труба; 5 – скважина; б- защитные сооружения; в - обделка горизонтальных и вертикальных выработок; г - защитные экраны; д - упрочнение грунта в пазухах и засыпках котлованов; е - подпорные стены и откосы; ж - оползневые склоны гор и косогоров; к - фундаменты и опоры; и - основания в проселочных грунтах; н - термогрунтовые строительные материалы; здесь для б...н: 1-нагревательная скважина; 2 - камуфлетное уширение; 3 - обожженный и сплавленный грунт; 4-разрыхленный грунт; 5 - энергопоглощающая прослойка; 6 - железобетон; 7 -сооружение; 8 -котлован; 9- линия скольжения призмы обрушения грунта; 10 - компрессор; 11 - емкость с топливом; 12 - трубопровод

Искусственно улучшенные основания, по мнению Р. А. Мангушева [73], устраиваются в тех случаях, когда естественные основания оказываются недостаточно прочными или сильно сжимаемыми и их использование, как и применение свайных фундаментов, является технически и экономически нецелесообразным. При этом используются как конструктивные методы улучшения работы грунтов основания, к которым относятся: устройство грунтовых подушек, применение шпунтового ограждения, создание боковых пригрузок, армирование грунта и другие, так и методы улучшения свойств оснований посредством их усиления и закрепления.

В систематизированном виде, сведенном в таблично-структурную форму, современные практикующие методы улучшения физико-механических свойств грунтов основания, включая армирование грунтов, приведены на (рис. 1). Схемы вертикального армирования грунтов при помощи инъекционного химического закрепления приведены на (рис. 12).

Рис.12 . Схемы структурного геомассива, сформированного в результате вертикального армирования структурно-неустойчивых грунтов основания при помощи инъекционного химического закрепления
 а – для одиночного инъектора; б – для сплошного массива, где: 1 – инъекторы, 2 – граница расчётного массива закреплённого столба грунта, 3 – действительный массив закреплённого грунта для однородной среды, 4 – перфорированная часть инъектора, 5 – сплошной массив закреплённого грунта; в – инъектор с отверстиями без защиты; д – то же, с отверстиями защищёнными резиновыми клапанами; е – то же, с отверстиями защищёнными резиновыми кольцами; ж – то же, с переменным сечением; к – то же, с выдвижной трубой, здесь: 1 – отверстия диаметром 3...5 мм; 2 – резиновый клапан.

В практике проектирования современных искусственных оснований давно известно увеличение несущей способности основания посредством его армирования. Эта идея легла в основу использования различных видов вертикального и горизонтального армирования слабых грунтовых оснований [10, 74].

Значительный вклад в изучение работы армированного основания внесла Л.М. Тимофеева [100]. Здесь рассмотрены основные виды армированных оснований: с однослойным армированием горизонтальными прослойками; с многорядным армированием горизонтальными прослойками; с армированием вертикальными и наклонными сваями; со смешанным армированием трехмерными, двухмерными и одномерными элементами различной ориентации.

Метод вертикального стержневого армирования появился сравнительно недавно. Аналогом этого метода является свайный фундамент с промежуточной подушкой [38]. В этом фундаменте, как и в методе вертикального армирования, ростверк (штамп) не имеет прочной связи со сваями (арматурой), что является отличительной особенностью в отличие от обычных свайных фундаментов с низким ростверком. Схемы структурных геомассивов, приведены на (рис. 13).

Рис. 13. Схемы структурных геомассивов, сформированных из вертикального армирования структурно-неустойчивых (слабых) грунтовых оснований с распределительной подушкой под фундаментом. *а* – с полной прорезкой слабого грунта; *б* – то же с демпфирующей распределительной песчаной прослойкой; *в* – то же в комплексе с горизонтальным армированием; *г* – то же в комплексе с грунтовой подушкой; *д* – с неполной прорезкой слабого грунта, в комплексе с грунтовой подушкой; *е* – то же в комплексе с горизонтальным армированием; 1 – столбчатый фундамент; 2 – вертикальный армоэлемент; 3 – распределительная железобетонная плита; 4 – песчаная прослойка; 5 – горизонтальный армоэлемент типа «Дорнит»; 6 – грунтовая подушка; 7 – структурно-неустойчивый грунт; 8 – надёжный (непросадочный) грунт.

Важным конструктивным компонентом в общей системе структурного геомассива является распределительная подушка (поз. 4 или 7 на рис. 12). Этот конструктивно-распределительный элемент, включается в совместную работу, как «гибкий» распределяющий слой (гибкий ростверк), который необходим для включения в совместную работу грунтового массива основания и армирующих элементов. Распределительная подушка, как правило назначается толщиной 300...600 мм и обычно выполняется из укатанного щебня фракции 20...50 мм. В итоге грунт укрепляется и в процессе твердения формируется жесткий каркас. Усиленный таким образом грунтовый массив является новым техногенным формированием, а его структура напоминает корневую систему дерева.

В том случае, когда армирование выполняется под подошвой ростверка, нагрузка от вышележащих конструкций передаётся на грунт подушки и через сваи на окружающий их грунт за счёт сил трения. Работа армоэлемента в грунте обеспечивается боковым обжатием и силами трения. Армоэлемент через контактную поверхность с грунтом или с фундаментом воспринимает нагрузку своей верхней частью и передает её на нижележащие слои своей нижней частью. Вертикальные стержни служат для восприятия сжимающих напряжений. Улучшение свойств основания вертикальным армированием позволяет передавать на основание возрастающие нагрузки, а при реконструкции, стабилизировать осадки.

В современных условиях для вертикального и наклонного армирования массивов грунта практикуется применение струйной цементации системы («jet grouting»), который оценивается, как метод закрепления грунтов, основанный на одновременном разрушении и перемешивании грунта высоконапорной струей цементного раствора (рис. 8, 9, 12). В результате этой технологической процедуры, в грунте образуются цементогрунтовые столбы-опоры диаметром 600-2000 мм. Цементогрунтовые элементы располагают с определенным шагом в плане и по глубине. Отличительной особенностью данного метода от инъекционных способов (цементации) служит то, что нет необходимости создания сплошного закрепленного массива. В грунте на необходимой глубине выполняются жесткие цементогрунтовые элементы. В зависимости от назначения, конструкция может быть выполнена в сплошном варианте (диаметр цементогрунтовых элементов больше расстояния между ними в осях, и они пересекаются между собой) и разреженном варианте, когда расстояние между элементами 2...3 диаметра. Разреженный структурный геомассив является искусственно улучшенным основанием с проектируемыми физикомеханическими характеристиками.

Недостаточность изученности НДС просадочных грунтов, армированных вертикальными элементами при формировании геомассивов, послужила для проведения экспериментальных лабораторных, полевых и теоретических исследований, выполненных автором [60...71]. Построены расчетные схемы и модели для определения НДС (прочность и деформация) при вычислении стесненной просадки грунта в структурном геомассиве, которым посвящена настоящая научная работа (рис. 14).

Рис. 14. Схемы к расчёту осадки, просадки и прочности структурного геомассива (упрочненного основания ФМЗ), сформированного из вертикальных армозаментов
 а – фрагмент плана фундамента и геомассива; б – разрез; в – расчетная схема одного армозаментов
 1 – фундамент, 2 – армозаменты, 3 – контур условного фундамента

Глав 2. Научно-теоретические исследования напряженно-деформированного состояния просадочных грунтов, армированных вертикальными элементами

На территории СНГ лессовые породы, проявляющие просадочные свойства, занимают площадь 3,3 млн. квадратных километров. Возведение и реконструкция надежных фундаментов и подземных сооружений на просадочных грунтах вызывает необходимость дополнительных затрат.

Поиск новых методов и способов, удовлетворяющих всем условиям строительства зданий на просадочных породах (в том числе вблизи от существующих зданий и сооружений), является актуальным.

Одним из таких, способов, сочетающим в себе элементы физико-химического улучшения строительных свойств лессовых просадочных пород, является – армирование грунтов вертикальными элементами, изготовленными непосредственно в массиве грунта. Наиболее приемлемыми в стесненных условиях являются: буромесительный способ [8, 9, 10, 11, 24, 57, 61 – 71, 94, 96, 98, 121, 123] и способ с применением струйной геотехнологии [21, 34, 72, 91].

В настоящее время работа и напряженно-деформированное состояние грунтовых массивов, армированных вертикальными элементами в просадочных породах при природной влажности и после замачивания, изучены недостаточно. Отсутствует единая методика расчета вертикально армированных грунтовых массивов, проявляющих просадочные свойства.

Поэтому весьма актуальным и своевременным является исследование работы армированных грунтовых массивов и разработка усовершенствованных методов расчета, наиболее достоверно отражающих поведение армированных просадочных грунтов при их природной влажности ($W < W_{sl}$) и после замачивания ($W > W_{sl}$).

2.1. Постановка задачи

Целью исследований является разработка нового метода расчёта прочности и деформативности просадочных грунтовых оснований, армированных вертикальными элементами с учётом совместного деформирования грунтов и армирующих массив элементов.

Для реализации поставленных целей были решены следующие задачи:

1. Проведен анализ существующих способов вертикального армирования грунтовых оснований, сложенных просадочными грунтами;
2. Выявлены основные закономерности формирования и развития напряжений и деформаций, в отдельных составляющих армированного массива грунта, и армированном основании в целом;
3. Произведен качественный и количественный анализ существующих методов расчёта прочности и деформативности оснований, армированных вертикальными армоэлементами;
4. Проведены экспериментальные исследования прочности и деформативности грунтов, армированных вертикальными армоэлементами;
5. На основе теоретических исследований, разработаны инженерные методы расчёта прочности и деформации (осадки и просадки) грунтовых оснований, сложенных просадочными породами и армированных вертикальными армоэлементами;
6. Осуществлена оценка точности и достоверности предлагаемых методов инженерных расчётов прочности и деформации (осадки и просадки) армированных грунтовых оснований, сложенных просадочными породами путём сравнения результатов теоретических исследований с данными, полученными в результате экспериментальных исследований, проведенных автором и другими исследователями.

2.2. Результаты экспериментально-теоретических исследований

Комплексное решение всех поставленных экспериментальных и научно-теоретических задач по разработке нового метода расчёта прочности и деформативности просадочных грунтовых оснований, армированных вертикальными элементами с учётом совместного деформирования грунтов и армирующих массив элементов, при действии внешних нагрузок, автором получены уникальные результаты, включая:

1. Экспериментальные исследования с изменениями прочности и деформативности моделей вертикально армированных грунтовых массивов при их природной влажности и увлажнении, в сравнении с неармированными просадочными породами;
2. Разработан инженерный метод расчёта прочности армированных вертикальными элементами оснований, сложенных из просадочных пород;
3. Разработан инженерный метод расчета осадки армированных вертикальными элементами грунтовых оснований, сложенных из просадочных пород;
4. Проведена проверки точности и надежности предлагаемых методов расчета прочности и деформативности армированных оснований, сложенных просадочными породами.

2.3. Научная новизна и актуальность

В связи с тем, что в настоящее время работа и напряженно-деформированное состояние грунтовых массивов, армированных вертикальными элементами в просадочных породах при природной влажности и после замачивания, изучены недостаточно, а также отсутствует единая методика инженерных расчетов вертикально армированных грунтовых массивов, проявляющих просадочные свойства, вопрос исследования армированных грунтов являются весьма актуальным и своевременным. Поэтому, научная новизна работы автора в области научно-теоретических и экспериментальных исследований стесненной просадки армированных вертикальными элементами просадочных грунтовых оснований, состоит в том, что на основании выполненных исследований разработаны методы расчета прочности и деформации (осадки и просадки) армированных грунтовых оснований, сложенных просадочными грунтами, позволяющие повысить достоверность расчетных значений несущей способности и деформативности упрочненного вертикальным армированием грунтового основания, и за счет этого получить экономичные проектные решения.

Основные результаты исследований докладывались и обсуждались на Российских и международных научных конференциях в городах СНГ: Самарканд, Казань, Чебоксары, Минск, Пермь, Пенза, Москва. По теме научных исследований автором опубликованы 22 работы, основные из которых приведены в [70, 71].

2.4. Научно-теоретические исследования

Особенность лессовых просадочных пород состоит в том, что при увеличении влажности, когда природная влажность W превышает значение начальной просадочной влажности W_{sl} ($W > W_{sl}$), существенно увеличиваются их деформационные и снижаются прочностные свойства. Следовательно, грунты, обладающие просадочными свойствами, не могут служить надежным основанием под здания или сооружения без техногенного преобразования их строительных свойств. В настоящее время применяются конструктивные, механические и физико-химические методы, обеспечивающие необходимую надежность сооружений, возводимых на просадочных породах. Выбор метода, в каждом конкретном случае, является важной и сложной задачей. В стесненных условиях строительства, наиболее приемлемым методом устранения просадки грунтов, является его армирование вертикальными элементами.

Исследованиям армированных оснований, посвящены труды: В.И.Крутова,

И.К.Попсуенко, С.П.Клепикова, А.И.Маркова, В.И.Гупаленко, А.А. Руденко, В.Г.Федоровского, С.Г.Безволева, С.Н.Левачева, Ю.М.Колесникова, Л.М.Тимофеевой, Ю.В.Фиофилова, А.Видаля, Т.Yamanuchi, З.Янга, К.З.Андрозса, Д.Кю, Д.К.Джоунса, М.М.Ал-Хасана, И.Бинкета, К.Ли, Т.С.Ингольда, Л.П.Кинга, Ф.Шлоссера, К.Стефани, Н.Т.Лонга, Ж.О.Акинмузера, Ж.А.Акинбольда, Holts Robert D., Т.Томаса, О.Бизимана, Hughes Thomas I.R., Prevost Gean H. Выполненный обзор и анализ результатов экспериментальных и теоретических исследований поведения армированных грунтовых массивов позволяет сделать общую оценку современного состояния проблемы. В экспериментальном плане вопросы прочности и деформативности грунтов, армированных вертикальными элементами, изучены недостаточно. Отсутствует единая теория и методика расчета просадочных грунтов, армированных вертикальными элементами при природной влажности $W=8...12\%$ и после увлажнения с превышением начальной просадочной влажности W_{sl} . Изучение состояния вопроса позволило обосновать направление дальнейшего развития исследований.

Напряженно-деформированное состояние грунтового массива, армированного вертикальными элементами, при приложении внешней нагрузки, принципиально отличается как от естественного грунтового основания, так и грунтового основания, в массив которого погружены вертикально или наклонно расположенные конструкции свай соединенные с ростверком. Вертикальные армоэлементы (1) в просадочном грунте (2), могут располагаться в виде армоэлементов-стоек и армоэлементов-трения (рис. 15).

Рис. 15. Схемы расположения армоэлементов в массиве просадочного грунта
а-армоэлемент-стойка; б-армоэлемент трения; в-график $S_{sl}=f(z)$

Рабочие гипотезы, для построения расчетной модели и формирования расчетного аппарата по оценке несущей способности и деформативности грунтового массива, обладающего просадочными свойствами и армированного, в связи с этим, вертикальными армоэлементами, вытекают из анализа напряженно-деформированного состояния, возникающего в армированном массиве при действии сжимающих нагрузок.

2.5. Предпосылки к теории расчета стесненной просадки

Выполненный анализ экспериментальных и теоретических исследований, проведенных различными авторами, позволяет сформулировать применительно к оценке несущей способности и деформативности просадочного грунта, армированного вертикальными элементами, следующие предпосылки:

- основание из просадочных грунтов, армированное вертикальными элементами, представляет собой искусственное основание, отличающееся, как от естественного основания, так и от свайного основания;

- вертикально расположенные в массиве грунта армирующие элементы, увеличивают несущую способность и снижают деформативность массива, взаимодействуя с грунтом по

боковым поверхностям и нижним торцам;

- рассматривается массив из грунтов I типа по просадочным свойствам;
- принимается гипотеза неразрывности просадочных деформаций;
- принимается, что в условиях природного напряженного состояния (до замачивания) лессовая грунтовая среда ведет себя, как упругая и закономерности ее поведения описываются уравнениями линейно-деформируемой среды;
- принимается, что просадка S_{sl} грунта зависит от влажности W грунта, а степень влажности S_r — от продолжительности t увлажнения массива грунта;
- напряженно-деформированное состояние увлажненных лессовых грунтов, описываются закономерностями теории линейной наследственной ползучести;
- процесс просадки представляется, как одномерное течение элементов структуры грунта в пределах некоторой ограниченной области увлажнения;
- степень дисперсности минеральных частиц структуры грунта, приводящая к образованию пластических деформаций, зависит только от количества влаги и не зависит от изменения направления ее движения в грунте;
- массив просадочного грунта, после его увлажнения выше W_{sl} , рассматривается, как сжимаемое упруговязкопластичное тело с квазиоднородной и квазиизотропной непрерывной структурой.

2.6. Основные функции прочности и деформативности вертикально армированного грунтового основания

Обобщая перечисленные предпосылки, сопротивление разрушению и деформированию армированного вертикальными элементами просадочного грунтового массива, можно представить в виде суммы сопротивлений разрушению грунта и армирующих грунтовой массив армоэлементов. При таком подходе, приведенную прочность сжатию $R_{cp.red}$ и приведенный модуль деформации $E_{cp.red}$ армированного массива, можно рассматривать, как функции:

$$R_{cp.red} = f_1(R_{cp}, R_{a3}, A_{cp}, A_{a3}, W, t, \phi, c, V_{cp}, V_{a3}, P_{sl}), \quad (1)$$

$$E_{cp.red} = f_2(E_{cp}, E_{a3}, A_{cp}, A_{a3}, W, t, \phi, c, V_{cp}, V_{a3}, P_{sl}), \quad (2)$$

Для изучения напряженно-деформированного состояния, оценки несущей способности и деформативности армированного грунта, принята расчетная модель массива, состоящая из просадочного грунта и армоэлементов (рис. 16).

Рис. 16. Схема армирования просадочного грунта основания.

а—разрез; б—план; 1-армоэлементы; 2-фундамент; 3-просадочный грунт; 4-непросадочный грунт

Задача определения несущей способности и деформативности армированного грунтового массива, решается в две стадии. Первая стадия отражает работу массива при его природной влажности ($W < W_{sl}$). Вторая стадия - работу массива после замачивания ($W > W_{sl}$), т.е. после просадочных деформаций.

2.7. Напряженно-деформированное состояние армированного вертикальными элементами просадочного грунтового массива

Напряженно-деформированное состояние (НДС) армированного вертикальными элементами просадочного грунтового массива исключительно сложное. В таком массиве совместно деформируются материалы с различными прочностными и деформативными свойствами. Деформации материалов происходят во взаимосвязанных условиях, при которых, свободные деформации просадочного грунта, сдерживаются армирующими элементами, а свободному деформированию армоэлементов препятствует просадочный грунт. В результате такого взаимодействия между просадочным грунтом и армоэлементами, в армированном грунтовом массиве, возникает сложное напряженное состояние.

Расчет армированного грунтового массива предлагается выполнять в два этапа. На первом этапе производится расчет прочности и деформативности армированного массива, при природной влажности просадочного грунта, а на втором этапе – после замачивания армированного массива грунта.

На первом этапе расчета, начальные напряжения до увлажнения ($W < W_{sl}$) в сечениях армированного грунтового массива, при загрузении вертикальной нагрузкой, определяются исходя из линейной зависимости между напряжениями и деформациями. Из условия равновесия внешних и внутренних сил имеем

$$\sigma_{zp,o} A = N, \quad (3)$$

$$N = q_{zp} A_{zp,o}, \quad (4)$$

Начальные напряжения в грунтовой части $\sigma_{ад.і}$ и в армоэлементах $\sigma_{аз.і}$ массива определяются по (5) и (6), в соответствии с расчетной схемой (рис. 17)

$$\sigma_{ад.і} = \frac{N}{A}, \quad (5)$$

$$\sigma_{аз,o} = \alpha \cdot \sigma_{zp,o}, \quad (6)$$

Рис. 17. Расчетная схема армированного просадочного грунта, при $W < W_{sl}$

Суммарные напряжения в грунте не должны превышать величины эквивалентного расчетного сопротивления $R_{ep}^{экв}$ массива армированного грунта

$$\sigma_{zp.o} + \sigma_{zg} \leq R_{ep}^{экв}, \quad (7)$$

Эквивалентное расчетное сопротивление $R_{ep}^{экв}$, армированного вертикальными элементами массива грунта при ($W < W_{sl}$) определяем по формуле (8)

$$R_{ep}^{экв} = \left[R_{ep} \frac{A_{ep} - A_{aэ}}{A_{ep}} + R_{aэ} \frac{A_{aэ}}{A_{ep}} \right], \quad (8)$$

где R_{ep} - расчетное сопротивление грунта, по СП 22.13330.2011 с использованием прочностных характеристик просадочного грунта при $W < W_{sl}$, кПа;

$R_{aэ}$ - прочность армирующих элементов, кПа;

A_{ep} - площадь грунтового массива, m^2 , определяемая границами армирования

Деформативные свойства армированного грунта, оцениваются эквивалентным модулем деформации $E_{ep}^{экв}$ с учетом влияния функций учитывающих глубину γ_{ei} и площадь $\gamma_{\mu i}$ армирования грунтового массива, определяемым по формуле (9)

$$E_{ep}^{экв} = \left[\frac{E_{ep} (A_{ep} - A_{aэ})}{A_{ep}} + \frac{E_{aэ} A_{aэ}}{A_{ep}} \right] \cdot \gamma_{ei} + \gamma_{\mu i}, \quad (9)$$

здесь $\gamma_{ei} = 1 + 0,3(l_{aэ}/h)$ и $\gamma_{\mu i} = 1,07[(\mu_i - \mu_1)/\mu_1]$, μ_i и μ_1 - соответственно, коэффициенты армирования грунта с количеством n и одним армозлементом.

На втором этапе расчета, после замачивания просадочного грунта, при давлении q_{zp} от приложенной нагрузки большей начального просадочного давления P_{sl} , ($q_{zp} > P_{sl}$), и влажности W , превышающей начальную просадочную влажность W_{sl} , ($W > W_{sl}$), необходимо учитывать влияние этих факторов на прочность и деформативность армированного грунтового массива.

При определении просадки грунта от внешней нагрузки, толщина зоны просадки h_{sl} , принимается равной толщине верхней зоны просадки $h_{sl,P}$, $h_{sl} = h_{sl,P}$. Нижняя граница указанной зоны соответствует глубине, где выполняется условие $\sigma_z = \sigma_{zp} + \sigma_{zg} = P_{sl}$, здесь σ_{zp} - напряжение в грунте от внешней нагрузки; σ_{zg} - напряжение в грунте от собственного веса; P_{sl} - начальное просадочное давление. При этом необходимо учитывать, что динамика просадочного процесса определяется динамикой насыщения толщ грунта инфильтрационной влагой. Принимается, что просадка P_{sl} зависит от влажности грунта W , а степень влажности S_r - от продолжительности увлажнения t . Механизм возникновения деформаций просадки в просадочных грунтах, при их увлажнении обуславливается взаимодействием влаги с межчастичными связями и внутрикристаллическими изменениями минеральных частиц этих грунтов в условиях определенного напряженного состояния.

Вследствие совместного проявления таких сложных физико-химических и механических процессов, возникают и одновременно развиваются два реологических процесса, а именно: нарастание пластических необратимых деформаций и уменьшение прочности при постоянной нагрузке и влажности. Просадка лессовых грунтов возникает в результате

действия на грунтовое основание нагрузки, оказывающейся предельной вследствие существенного снижения показателей прочности этих грунтов при их увлажнении. Поэтому, просадочная деформация должна рассматриваться, как следствие разрушения структуры лессовых грунтов в результате изменения их физического состояния и расчет основания, сложенного этими грунтами, помимо расчета по деформациям, следует производить расчет по прочности.

В армированном грунтовом массиве, армирующий армоэлемент вследствие его сцепления по боковой поверхности с окружающим его просадочным грунтом, становится внутренней связью, препятствующей свободной просадке грунта при замачивании. Согласно опытным данным В. И. Крутова, просадка армированного грунта в 2-2,5 раза меньше, чем просадка неармированного грунта. Стесненные деформации просадки грунта приводят к появлению в армированном грунтовом массиве дополнительных, внутренне уравновешенных, напряжений. Причем, в грунте возникают напряжения растяжения, а в вертикальном элементе – напряжения сжатия. Под влиянием разности деформаций $\Delta \varepsilon_{sl}$ между свободной просадкой грунта ε_{sl} и стесненной просадкой армированного грунта $\varepsilon_{sl,aэ}$ (10)

$$\Delta \varepsilon_{sl} = \varepsilon_{sl} - \varepsilon_{sl,aэ}, \quad (10)$$

в грунте с модулем деформации E_o^I возникают напряжения растяжения $\Delta \sigma_{zn}$ (11)

$$\Delta \sigma_{zn} = \Delta \varepsilon_{sl} E_o^I, \quad (11)$$

Наибольшие значения этих напряжений, формируются в зоне контакта с армоэлементом. В армоэлементе с модулем упругости $E_{aэ}$ возникают упругие деформации $\varepsilon_{sl,aэ}$ и формируются дополнительные напряжения сжатия $\Delta \sigma_{aэ}$ (12)

$$\Delta \sigma_{aэ} = \varepsilon_{sl,aэ} E_{aэ}, \quad (12)$$

Уравнение равновесия внутренних напряжений (13)

$$\Delta \sigma_{aэ} A_{aэ} = \Delta \sigma_{zn} A_{cp}, \quad (13)$$

где $A_{aэ}$, A_{cp} - суммарная площадь сечений армоэлементов и площадь грунта, м².

Из (13) при коэффициенте армирования $\mu = \frac{A_{aэ}}{A_{cp}}$, имеем (14)

$$\Delta \sigma_{aэ} = \Delta \sigma_{zn} \frac{A_{cp}}{A_{aэ}} = \frac{\Delta \sigma_{zn}}{\mu}, \quad (14)$$

Выразив деформации через напряжения, имеем $\frac{\Delta \sigma_{zn}}{E_o^I} = \varepsilon_{sl} - \frac{\Delta \sigma_{zn}}{\mu E_{aэ}}$.

Теперь найдем напряжения растяжения в грунте по выражению (15)

$$\Delta\sigma_{zn} = \frac{\varepsilon_{sl} E_{aэ}}{\frac{E_{aэ}}{E_o'} + \frac{1}{\mu}}, \quad (15)$$

Дополнительные напряжения сжатия в армозlemente, от просадки грунта определим по выражению (16)

$$\Delta\sigma_{aэ} = \frac{\varepsilon_{sl} E_{aэ}}{\left(\frac{E_{aэ}}{E_o'} + \frac{1}{\mu}\right) \mu}, \quad (16)$$

При просадке увлажненного массива просадочного грунта, дополнительные напряжения растяжения в грунте и дополнительные напряжения сжатия в армозlementах, зависят от: деформации свободной просадки ε_{sl} ; коэффициента армирования грунта μ ; модуля деформации грунта E_{cp} и вертикально расположенного армирующего элемента $E_{aэ}$. С увеличением количества армозlementов дополнительные напряжения растяжения в грунте возрастают, а дополнительные напряжения сжатия в армирующих элементах – уменьшаются (рис. 18). Тогда полные напряжения в грунте $\sigma_{cp}(t)$ и армозlementах $\sigma_{aэ}(t)$ после просадки имеют соответственно вид (17) и (18)

$$\sigma_{cp}(t) = \sigma_{cp,o} - \Delta\sigma_{zn}, \quad (17)$$

$$\sigma_{aэ}(t) = \sigma_{aэ,o} + \Delta\sigma_{aэ}, \quad (18)$$

Рис. 18. Расчетно-теоретическая модель трансформации напряжений в массиве просадочного грунта и в вертикальных армозlementах при природной влажности ($W < W_{sl}$) и после увлажнения ($W > W_{sl}$) массива армированного просадочного грунта.

a -начальные напряжения в армированном массиве грунта до замачивания, при $W < W_{sl}$; $б$ -дополнительные напряжения в армированном массиве грунта после замачивания, при $W > W_{sl}$; $в$ -полные напряжения в армированном массиве грунта после замачивания, при $W > W_{sl}$

Вследствие проявления пластических деформаций просадочным грунтом в стесненных условиях происходит увеличение напряжений $\sigma_{aэ}(t)$ в армоэлементах и уменьшение напряжений $\sigma_{zp}(t)$ в грунте.

Таким образом, для оценки прочности лессового просадочного грунтового массива, армированного вертикальными элементами после проявления деформаций просадки, необходимо учитывать единовременное изменение напряженно-деформированного состояния, прочности грунта и армоэлементов. Уменьшение прочности просадочного грунта $R_{zp}(t)$ в процессе пластического течения, определяется по СП 22.13330.2011 «Основания зданий и сооружений. Актуализированная редакция СНиП 2.02.01-83*» при $\varphi(t)$, $c(t)$ и $S_r > 0,85$.

Для учета влияния напряжений в армоэлементе и грунтовом массиве вводим функции накопления $H_{\sigma_{aэ}}$ и $H_{\sigma_{zp}}$. Функция накопления напряжений в армирующем элементе $H_{\sigma_{aэ}}$ представляет собой отношение суммарных напряжений в армоэлементе в момент времени t к начальным напряжениям (19)

$$H_{\sigma_{aэ}} = \frac{\sigma_{aэ.o} + \Delta\sigma_{aэ}}{\sigma_{aэ.o}} = 1 + \frac{\Delta\sigma_{aэ}}{\sigma_{aэ.o}} = 1 + \frac{\varepsilon_{sl} E_{aэ}}{\left(\frac{E_{aэ}}{E_o} + \frac{1}{\mu}\right) \mu \sigma_{aэ.o}}, \quad (19)$$

Аналогично определяется функция накопления напряжений $H_{\sigma_{zp}}$ в грунте (20)

$$H_{\sigma_{zp}} = \frac{\sigma_{zp.o} - \Delta\sigma_{zp}}{\sigma_{zp.o}} = 1 - \frac{\Delta\sigma_{zp}}{\sigma_{zp.o}} = 1 - \frac{\varepsilon_{sl} E_{aэ}}{\left(\frac{E_{aэ}}{E_o^I} + \frac{1}{\mu}\right) \sigma_{zp.o}}, \quad (20)$$

Тогда, эквивалентная прочность $R_{zp}^{экв}$ грунтового массива, армированного вертикальными элементами, после увлажнения грунта примет вид (21)

$$R_{zp}^{экв} = \frac{R_{zp}(t)}{H_{\sigma_{zp}}} \cdot \frac{A_{zp} - A_{aэ}}{A_{zp}} + \frac{R_{aэ}}{H_{\sigma_{aэ}}} \cdot \frac{A_{aэ}}{A_{zp}}, \quad (21)$$

где $R_{aэ}$ - прочность или расчетное сопротивление армоэлемента.

Увлажнение просадочного грунта приводит к возникновению и развитию пластических деформаций просадок грунта. Вследствие этого, происходит изменение модуля деформации грунта и всего армированного массива. Происходит стесненная деформация грунта и армоэлементов. Свободному деформированию увлажненного грунта препятствуют вертикальные армоэлементы, а деформированию армоэлементов препятствует окружающий их грунт. Тогда стесненные деформации просадки $\varepsilon_{sl,a}$ будет иметь вид (22)

$$\varepsilon_{sl,a} = \frac{\Delta\sigma_{aэ}}{E_{aэ}} = \frac{\varepsilon_{sl} E_{aэ}}{\left(\frac{E_{aэ}}{E_o^I} + \frac{1}{\mu}\right) \mu E_{aэ}} = \frac{\varepsilon_{sl}(t)}{\left(\frac{E_{aэ}}{E_o^I} + \frac{1}{\mu}\right) \mu}, \quad (22)$$

В соответствии с теорией наследственной ползучести, относительные деформации

просадки $\varepsilon_{sl}(t)$ грунта, вычисляются по формуле (23)

$$\varepsilon_{sl}(t) = \frac{1}{E_o^I} \left[\sigma(t) + \int_0^t K(t-\tau) \sigma(\tau) d\tau \right], \quad (23)$$

Принимаем степенное ядро ползучести грунта $K(t-\tau)$ типа Абеля по формуле (24)

$$K(t-\tau) = \delta (t-\tau)^{-\alpha_o}, \quad (24)$$

где δ , α_o - постоянные эксперимента, ($0 < \alpha_o < 1$); t - время действия нагрузки, а также, в (23) $\sigma(\tau) = \sigma = const$, тогда уравнение развития относительных деформаций свободной просадки $\varepsilon_{sl}(t)$ примет вид (25)

$$\varepsilon_{sl}(t) = \frac{\sigma}{E_o^I} \left[1 + \frac{\delta}{1-\alpha_o} t^{1-\alpha_o} \right], \quad (25)$$

Относительные деформации стесненной просадки армированного грунта (26)

$$\varepsilon_{sl,\alpha}(t) = \frac{\frac{\sigma \left[1 + \frac{\delta}{1-\alpha_o} t^{1-\alpha_o} \right]}{E_o^I}}{\left(\frac{E_{a3}}{E_o^I} + \frac{1}{\mu} \right) \mu}, \quad (26)$$

Эквивалентный модуль деформации $E_{zp}^{экв}$ армированного грунтового массива, при развитии деформаций просадки (27)

$$E_{zp}^{экв} = \frac{\sigma}{\varepsilon_{sl,\alpha}(t)} = \frac{\frac{\sigma}{E_o^I} \left[1 + \frac{\delta}{1-\alpha_o} t^{1-\alpha_o} \right]}{\left(\frac{E_{a3}}{E_o^I} + \frac{1}{\mu} \right) \mu} = \frac{\left(\frac{E_{a3}}{E_o^I} + \frac{1}{\mu} \right) \mu E_o^I}{\left[1 + \left(\frac{\delta}{1-\alpha_o} \right) t^{1-\alpha_o} \right]}, \quad (27)$$

Полная деформация армированного массива равна сумме S и S_{sl} определяется по (28)

$$S_{II} = S + S_{sl}, \quad (28)$$

Распределение напряжений в массиве, сложенном просадочными породами, который упрочнен при помощи его армирования вертикальными стержневыми элементами, рассматривается на примере обобщенной схемы, приведенной на (рис. 19).

Рис. 19. Схема распределения напряжений в армированном массиве

Просадку S_{sl} армированных грунтов при замачивании больших площадей, определяем по (29)

$$S_{sl} = \sum_{i=1}^n \varepsilon_{sl.aэ,i}(t) \cdot h_i \cdot k_{sl,i}, \quad (29)$$

Относительную просадку $\varepsilon_{sl.aэ,i}(t)$, армированного грунта определяем по (30)

$$\varepsilon_{sl.aэ,i}(t) = \frac{\frac{(\sigma_{zg} + \sigma_{zp})}{E_o^I} \left[1 + \frac{\delta}{1 - \alpha_o} t^{1-\alpha_o} \right]}{\left(\frac{E_{aэ}}{E_o^I} + \frac{1}{\mu} \right) \mu}, \quad (30)$$

Тогда формулу расчетной просадки $S_{sl,a}(t)$ просадочного массива грунта, армированного вертикальными элементами, запишем в виде выражения (31)

$$S_{sl,a}(t) = \sum_{i=1}^n \frac{\frac{(\sigma_{zg} + \sigma_{zp})}{E_o^I} \left[1 + \frac{\delta}{1 - \alpha_o} t^{1-\alpha_o} \right]}{\left(\frac{E_{aэ}}{E_o^I} + \frac{1}{\mu} \right) \mu} \cdot h_i \cdot k_{sl,i}, \quad (31)$$

2.8. Алгоритм расчета просадочного массива грунта, армированного вертикальными элементами по I-ой (прочности) и II-ой (деформациям) группам предельных состояний

В настоящее время расчет грунтового массива, армированного вертикальными элементами (геомассива) не имеет единой апробированной на практике методики. По результатам теоретических и экспериментальных исследований [66, 67, 68, 69, 70, 71], сопоставленных с экспериментами других исследователей [42, 45], автором предлагается алгоритм расчета геомассива. Расчет предлагается производить в два этапа. На первом этапе, производится расчет просадочного грунта, армированного вертикальными элементами при природной влажности ($W < W_{sl}$), а на втором этапе - после его замачивания ($W > W_{sl}$). В систематизированном виде, алгоритм расчета приведен ниже.

2.3. Параметры нелинейности деформирования $\beta_{red}(W_{cp})$ и $m_{red}(W_{cp})$ при

$$\beta_{red.эф} = \frac{m_{v.red}}{E_{zp.экв}}, \quad (9); \quad \alpha_2 = \frac{E_{zp.эф}(t)}{E_{zp}(t)}, \quad (10)$$

$$\beta_{red}(W_{cp}) = \alpha_1 \beta(W_o) - \frac{\alpha_1 \beta(W_o) - \alpha_2 \beta(W_{sat})}{W_{sat} - W_o} (W_{cp} - W_o), \quad (11)$$

$$m_{red}(W_{cp}) = \alpha_1 m(W_o) - \frac{\alpha_1 m(W_o) - \alpha_2 m(W_{sat})}{W_{sat} - W_o} (W_{cp} - W_o), \quad (12)$$

2.4. Линейные функции «с» и « ϕ » в зависимости от влажности «W»

$$C(W_{cp}) = C_o - \frac{C_o - C_n}{W_{sat} - W_o} (W_{cp} - W_o), \quad (13); \quad tg \phi(W_{cp}) = f_o - \frac{f_o - f_n}{W_{sat} - W_o} (W_{cp} - W_o), \quad (14)$$

2.5. Напряжения в геомассе при деформировании просадочного грунта.

$$\text{Уравнение равновесия в армированном массиве} \quad \Delta \sigma_{a3} A_{a3} = \Delta \sigma_{zn} A_{zp}, \quad (15)$$

$$\text{Дополнительные: в грунте } \Delta \sigma_{zn} = \frac{\varepsilon_{sl} E_{a3}}{\frac{E_{a3}}{E_o^I} + \frac{1}{\mu}} \quad (16); \quad \text{в армоэлементе } \Delta \sigma_{a3} = \frac{\varepsilon_{sl} E_{a3}}{\left(\frac{E_{a3}}{E_o^I} + \frac{1}{\mu} \right) \mu}, \quad (17)$$

$$\text{Полные: в грунте } \sigma_{zp}(t) = \sigma_{zp.o} - \Delta \sigma_{zn}, \quad (18); \quad \text{в армоэлементе } \sigma_{a3}(t) = \sigma_{a3.o} + \Delta \sigma_{a3}, \quad (19)$$

2.6. Функции накопления напряжений $H_{\sigma_{a3}}$ и $H_{\sigma_{zp}}$ во времени t :

$$H_{\sigma_{a3}} = \frac{\sigma_{a3.o} + \Delta \sigma_{a3}}{\sigma_{a3.o}} = 1 + \frac{\Delta \sigma_{a3}}{\sigma_{a3.o}} = 1 + \frac{\varepsilon_{sl} E_{a3}}{\left(\frac{E_{a3}}{E_o^I} + \frac{1}{\mu} \right) \mu \sigma_{a3.o}}, \quad (20)$$

$$H_{\sigma_{zp}} = \frac{\sigma_{zp.o} - \Delta \sigma_{zp}}{\sigma_{zp.o}} = 1 - \frac{\Delta \sigma_{zp}}{\sigma_{zp.o}} = 1 - \frac{\varepsilon_{sl} E_{a3}}{\left(\frac{E_{a3}}{E_o^I} + \frac{1}{\mu} \right) \sigma_{zp.o}}, \quad (21)$$

2.7. Расчетное сопротивление геомассива после замачивания

$$R_{zp}^{экв} = \frac{R_{zp}(t)}{H_{\sigma_{zp}}} \cdot \frac{A_{zp} - A_{a3}}{A_{zp}} + \frac{R_{a3}}{H_{\sigma_{a3}}} \cdot \frac{A_{a3}}{A_{zp}}, \quad (22)$$

2.8. Относительная деформация стесненной просадки армированного грунта

$$\varepsilon_{sl.a3,i}(t) = \frac{(\sigma_{zg} + \sigma_{zp})}{E_o^I} \left[1 + \frac{\delta}{1 - \alpha_o} t^{1-\alpha_o} \right] \frac{1}{\left(\frac{E_{a3}}{E_o^I} + \frac{1}{\mu} \right) \mu}, \quad (23)$$

Использование предлагаемого алгоритма при расчете прочности и деформативности просадочных грунтов, армированных вертикальными элементами, позволяет с достаточно высокой степенью достоверности прогнозировать напряженно деформированное состояние геомассивов на любой стадии загрузки внешней нагрузкой и в произвольный период от начала его замачивания.

Расхождение результатов расчета просадки S_{sl} и осадки S по предлагаемым формулам (24 и 26) алгоритма и экспериментам [66, 42, 45], составляет не более 20%.

Глава 3. Экспериментальные исследования НДС просадочных грунтов, армированных вертикальными элементами

Для изучения работы массива грунта армированного вертикальными элементами автором были проведены лабораторные испытания в одометре (рис.20а) и объемном лотке (рис. 20б, в, г), а также использованы результаты лабораторных и натурных исследований других авторов.

В работе исследовалась прочность материала армоэлементов, деформативность лесовых и песчаных (рыхлых) грунтов, армированных вертикальными элементами, в зависимости от процента армирования грунта μ , %; диаметра $d_{a\vartheta}$ и длины $l_{a\vartheta}$ армоэлементов. Опыты проводились с трехкратной повторяемостью каждой серии.

В качестве армоэлементов использовались цементогрунтовые, гипсолитовые, стальные и деревянные модели-армоэлементы.

а – в одометре с повышенным срезным кольцом; *б*, *в*, *г* – то же и в объемном лотке; *б* – план, разрез, где: 1, 2 – ИЧ, установленные на штампе; 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10 – то же, на грунте; 11 – кронштейн; 12 – опора; 13 – грунт; *в* – лоток с загрузочным устройством, где: 1 – грунт; 2 – армозлементы; 3 – штамп; 4 – лоток; 5 – рама; 6 – шар-шарнир; 7 – шток; 8 – коромысло; 9 – трос; 10 – блок запасовки троса; 11 – неподвижная опора; 12 – втулка; 13 – секторный рычаг; 14 – противовес; 15 – подвеска; 16 – плита-кронштейн; 17 – чека; 18 – монтажный крюк; 19 – регулируемая опора; 20 – стенка лотка; 21 – днище лотка; 22 – ребро жесткости лотка

3.1. Результаты экспериментальных исследований

Установлено, что осадка грунта под штампом одометра, происходит в пределах неармированной и армированной части по высоте срезного кольца за счет деформаций грунта и материала армоэлементов, изготовленных из цементогрунта.

Сводные графики зависимости изменения осадки S от давления P , процента армирования μ массива грунта и модуля деформации E от μ приведены на (рис. 21).

Рис. 21. Зависимости $S=f(\sigma)$, $S=f(\mu)$, $E=f(\mu)$ армированного грунта в одометре
а- $S=f(\sigma)$, 1- не армирован, 2-13-армирован; б- $S=f(\mu)$, $E=f(\mu)$

Эффективными факторами, снижающими величину осадки S штампа, при лотковых испытаниях грунтов, армированных вертикальными элементами, являются: армирование в пределах сжимаемой толщи массива (снижение S от 25% до 85%); армирование грунта непосредственно под штампом и за пределами его контура (снижение S на 10-15%); увеличение процента армирования грунта μ от 4,7 % до 18,9 % приводит к снижению осадки S в 2,6-4 раза. Зависимости осадки $S=f(\mu, l_{a3}, d_{a3}, P)$ приведены на (рис. 22 и 23).

Рис. 22. Сводные графики зависимости $S = f(\mu, l_{a3}, d_{a3})$ осадки штампа S от μ, l_{a3}, d_{a3} .
а, б, в, г – схемы вертикального армирования грунта под штампом; 1 – грунт не армирован, $\mu=0\%$; 2, 3, 4 – грунт армирован $\mu=0,046\%-0,11\%$, 4-я, 9-ю, 17-ю элементами длиной $l_{a3}=280 \text{ мм}$, $d_{a3}=3 \text{ мм}$; 5, 6, 7 – то же, $l_{a3}=560 \text{ мм}$, $d_{a3}=3 \text{ мм}$; 8, 9, 10 – то же, $\mu=0,3656\%-0,4133\%$, $l_{a3}=280 \text{ мм}$, $d_{a3}=6 \text{ мм}$; 11, 12, 13 – то же, $\mu=0,3656\%-0,4133\%$, $l_{a3}=560 \text{ мм}$, $d_{a3}=6 \text{ мм}$; ИЧ – индикаторы часового типа, для измерения осадки штампа и грунта

Рис. 23. Сводные графики зависимости $S = f(P, \mu, l_{a3}, d_{a3})$ осадки S от P, μ, l_{a3}, d_{a3} .
 а, б, в, г – схемы вертикального армирования грунта под штампом; 1 – грунт не армирован, $\mu=0\%$; 2, 3, 4 – грунт армирован $\mu=0,046\%-0,11\%$, 4-я, 9-ю, 17-ю элементами длиной $l_{a3}=280\text{мм}$, $d_{a3}=3\text{мм}$; 5, 6, 7 – то же, $l_{a3}=560\text{мм}$, $d_{a3}=3\text{мм}$; 8, 9, 10 – то же, $\mu=0,3656\%-0,4133\%$, $l_{a3}=280\text{мм}$, $d_{a3}=6\text{мм}$; 11, 12, 13 – то же, $\mu=0,3656\%-0,4133\%$, $l_{a3}=560\text{мм}$, $d_{a3}=6\text{мм}$

Сопоставление результатов экспериментальных исследований армированных грунтов в лотке и одометре с результатами расчетов показали хорошую сходимость (отклонение не более 15%).

Результаты расчетов по предлагаемым в работе формулам при определении: напряжений в армоэлементах, неармированном и армированном массиве грунта в условиях его природной влажности ($W < W_{sl}$) и после замачивания ($W > W_{sl}$); свободной и стесненной просадки, сопоставлены также с результатами натурных испытаний просадочных грунтов, армированных вертикальными элементами, проведенных В. И. Крутовым и И. К. Попсуенко (1975-1976 гг.) в г. Запорожье, в которых моделировались условия неравномерного одностороннего замачивания сверху из котлована размером 8х15м, глубиной 0,6м, массива просадочных лессовидных суглинков и супесей мощностью 28 метров, армированных вертикальными элементами в пределах здания размером 12х13м. Схема испытаний приведена на (рис. 24).

Рис. 24. Схема натурных испытаний по В. И. Крутову и И. К. Попсуенко

a - план экспериментальной площадки с расположением поверхностных марок (ПМ), шлаконаливных свай (С-1...С-25), шурфов (Ш-1, Ш-2) и изолиний просадок поверхности; *б* - фрагмент плана геомассива; *в* - разрез; 1 - контур армированного массива; 2 - котлован для замачивания; 3 - вертикальный армоэлемент; 4 - уплотненная зона; 5 - шурфы с мессдозами и глубинными марками; 6 - мессдозы; 7 - глубинные марки; 8 - граница увлажнения; 9 - кривые просадки поверхности

Анализ сопоставления результатов расчета по предлагаемому методу с результатами натурных экспериментов показывает, что полученные расчетные уравнения достоверно описывают качественные изменения напряженно-деформированного состояния, составляющих элементов, армированного грунтового массива при его замачивании. Результаты сопоставления экспериментальных и теоретических значений напряжений и деформаций в армоэлементах и грунте показаны на (рис. 25).

Рис. 25. Сопоставление результатов эксперимента и расчета просадки S_{st} и напряжений σ .
 а - $S_{st}=f(H)$ 1...2 -эксперимент, 3...4 -расчет; б - $\sigma=f(t)$ -в армоэлементах 1...2 -эксперимент, 6...7 -расчет, в грунте 3...5 -эксперимент, 8...9 -расчет

Экспериментально установлено, что интенсивный набор прочности цементогрунта, как материала для вертикальных армирующих элементов, происходит в первые 90 суток (70%). В процессе экспериментов по подбору оптимального состава цемено-грунтовой смеси для армоэлементов, исследовалось влияние пластифицирующей добавки ацетон-формальдегидной смолы АЦФ-3М-65. Установлено, что оптимальное количество добавки АЦФ-3М-65 составляет 0,15% по весу составляющих компонентов цемено-грунтовой смеси. Применение пластифицирующей добавки АЦФ-3М-65, позволяет повысить прочность образцов-цилиндров на одноосное сжатие под гидропрессом до 20%.

Выводы

1. При строительстве на просадочных грунтах, в стесненных условиях, механические и инъекционные методы не всегда могут быть полностью реализованы для обеспечения прочности и надежности оснований. Поэтому, вертикальное армирование структурно-неустойчивых грунтовых массивов, проявляющих просадочные свойства при их увлажнении, элементами изготовленными в грунте буроинъекционным и буросмесительным способами или с использованием струйной геотехнологии, является перспективным и надежным методом упрочнения структурно-неустойчивых грунтов.

2. Напряженно-деформированное состояние просадочных грунтов оснований, армированных вертикальными элементами, изучено недостаточно. Отсутствует единая теория и методика расчета грунтов, армированных вертикальными элементами при природной влажности и после увлажнения просадочного массива выше начальной просадочной влажности ($W > W_{sl}$).

3. Экспериментально установлено, что при вертикальном армировании грунтов в лотке и одометре, в зависимости от: процента армирования грунта μ (0...3...18,9%); количества армозащитных элементов n (1...17 шт); диаметра армозащитных элементов $d_{аз}$ (3...8...10 мм) и их длины $l_{аз}$ (80...560 мм) повышаются значения модуля деформации E и расчетного сопротивления R грунта, рассматриваемые как их эквивалентные значения, соответственно, $E_{сп}^{экв}$ и $R_{сп}^{экв}$. При этом, эквивалентное значение модуля деформации армированного грунта $E_{сп}^{экв}$ возрастает до 2,5 раза, а эквивалентное значение расчетного сопротивления армированного грунта $R_{сп}^{экв}$ возрастает до 3 раз по отношению к их начальным значениям E и R для различных вариантов армирования. При испытании армированного грунта без возможности бокового расширения (в одометре), зафиксировано, что осадка происходит в пределах его неармированной и армированной зон по высоте срезного кольца ($h_k=145$ мм), при этом, сжимаемость армированной части грунта снижается от 23% до 9% при повышении μ от 0,3% до 3%.

4. В результате теоретических исследований получены закономерности перераспределения усилий между армозащитными элементами и окружающим их грунтовым массивом, вследствие проявления стесненных просадочных свойств при замачивании просадочного массива. Показано, что под влиянием внешнего давления q после замачивания армированного грунтового массива ($W > W_{sl}$), наряду с начальными напряжениями, соответственно, в грунте $\sigma_{сп.о}$ и в армозащитном элементе $\sigma_{аз.о}$, возникают дополнительные напряжения растяжения в грунте $\Delta\sigma_{zn}$ и дополнительные напряжения сжатия $\Delta\sigma_{аз}$ в армозащитных элементах. По этой причине полные напряжения в грунте $\sigma_{сп}(t)$ уменьшаются, а в армозащитных элементах $\sigma_{аз}(t)$ увеличиваются по сравнению с начальными напряжениями в массиве грунта до его увлажнения.

5. Разработан инженерный метод расчета прочности и деформативности просадочных грунтовых массивов, армированных вертикальными элементами, в условиях природной влажности ($W < W_{sl}$) и после замачивания ($W > W_{sl}$) с учетом одновременного изменения напряженно-деформированного состояния грунтов и армозащитных элементов за счет перераспределения усилий, изменения прочностных и деформативных свойств просадочных грунтов.

6. Достоверность предлагаемого метода расчета по определению напряжений, прочности, модуля деформации, свободной просадки, стесненной просадки и осадки при природной влажности и после замачивания армированного грунта проверена путем сопоставления результатов расчета с результатами экспериментов проведенных автором и другими исследователями. Сопоставления показывают достаточно хорошую сходимость теоретических и экспериментальных значений прочности и деформативности армированного грунта.

Список библиографических ссылок

1. Абелев Ю. М., Абелев М. Ю. Основы проектирования и строительства на просадочных грунтах. - М.: Стройиздат, 1979. - 272 с.
2. Абелев М. Ю., Ильичев В. А., Ухов С.Б., и др. Строительство зданий и сооружений в сложных грунтовых условиях. М., 1986.
3. Абелев М. Ю., Федоров Б. С. Современные проблемы фундаментостроения в сложных грунтовых условиях. Строительство зданий и сооружений в сложных грунтовых условиях. Под ред. М. Ю. Абелева. (Курсом ускорения научно-технического прогресса). -М.: Стройиздат, 1986. с. 5-15.
4. Ананьев В. П. Минералогический состав и свойства лессовых грунтов. -Ростов-на-Дону.: РГУ, 1964. - 218 с.
5. Ананьев В. П. Режим влажности и прочности лессовых грунтов в основании зданий и сооружений. - Изв. Вузов Геология и разведка. 1966, №2, с. 121-123.
6. Акимов А. А., Улиткин Г. К. Фундаменты из грунтобетона. - В кн.: сб. трудов № 4 НИИ по строительству в г. Ростов-на-Дону, с. 174-187.
7. Аскалонов В. В., Вайсфельд Г. Б. Фундаменты зданий из цементогрунтовых смесей. -В кн.: Сб. трудов НИИОСП № 23 "Искусственное закрепление грунтов". М., Стройиздат. 1954, с. 30-31.
8. Аскалонов В. В., Токин А. Н. Здания и сооружения из цементогрунта.-М.: Стройиздат, 1957-112с.
9. Аскалонов В. В., Вайсфельд Г. Б., Чаликова Е. С. Свойства цементогрунтовых смесей и технология их приготовления для устройства фундаментов. -В кн.: "Закрепление грунтов". Сб. трудов НИИОСП, № 31, М., Стройиздат. 1957, с.70-91.
10. Антонов, В. М. Экспериментальные исследования армированных оснований: монография / В. М. Антонов. - Тамбов: Изд-во ГОУ ВПО ТГТУ, 2011. - 80 с.
11. Bagir T. Irag. Journal, British Museum, 1944, pp. 5-6.
12. Безрук В. М. Теоретические основы укрепления грунтов цементом. -М.: Автотрансиздат, 1956.
13. Балаев Л. Г. Зависимость величины просадочных деформаций лессовых грунтов от степени их увлажнения. - Науч. Зап. МИИВХ. - М.: МИИВХ, 1960, т. 23., с. 6 - 8.
14. Быков В. С. Типы лессовых пород юга Украины и их инженерно-геологическая характеристика. - М.: Изд. АН. СССР, 1962 - 217 с.
15. Безрук В. М. Укрепление грунтов. М., Транспорт, 1965.-340 с.
16. Безрук В. М. Укрепление грунтов в дорожном и аэродромном строительстве. -М.: Транспорт, 1971. - 246 с.
17. Barvashov V.A., Budanov V.G., Fomin A.N, Perkov U.R. and Pushkin V.I. Deformations of soil foundation reinforced with prestressed synthetic fabrics, C.R. Coll. Int. Sols Textiles, Paris, 1977.
18. Bassett N. Prefabrication Roman style. New Civil Engineer, August, 1981.
19. Безрук В.М., Гурячков И.Л., Луканина Т.М., Агапова Р.А. Укрепление грунта. -М.: Транспорт, 1982.
20. Безрук В. М. Итоги и перспективы применения укрепленных грунтов в строительстве. -В кн.: "Применение цементогрунта в фундаментостроении". Тезисы докладов Всесоюзного совещания. М., Стройиздат, 1984. с.13-17.
21. Бройд И. Д. Струйная геотехнология.-М.: Изд-во АСВ, 2004.-442 с.
22. Vurray R. T. Research at TRRL to develop design criteria for Reinforced Earth, Symp. Research earth and other composite soil techniques. Heriot-Watt University, TRRL Sup.457, 1977.
23. Westergaard H. M. A problem of elasticity suggested by a problem in soil mechanics. Soft material reinforced by numerous strong horizontal sheets, Harvard University, 1938.
24. Ветштейн А. И. Закрепление лессовых просадочных грунтов цементом буросмесительным способом. Дис. на соиск.уч.ст.канд.техн.наук, НИИОСП, 1983. -152с.
25. Гольштейн М.Н. Механические свойства грунтов. - М.: Стройиздат, 1971, - с.366; 1973, - с. 374; 1979, - с. 304.
26. Гончарова Л.В. Основы искусственного улучшения грунтов. -М.: МГУ, 1973.
27. Григорян А. А., Григорян Р. Г. Экспериментальное изучение сил «отрицательного трения» по боковой поверхности свай при просадке грунтов от собственного веса. - Основания, фундаменты и механика грунтов, 1975, № 5, с. 10-13.
28. Гупаленко В. А., Руденко А. А. Исследование работы буронабивных свай и уплотненных массивов при просадках окружающих их грунтов от собственного веса. - Основания, фундаменты и механика грунтов, 1976, № 2, с. 17-19.
29. Грачев Ф. А., Токин А. Н., Шапошников А. В. Буросмесительные машины// ж. Механизация стро-ва. - 1988. - №3. с.14-15.
30. Duncan W. Caesar, Harper Brothers, New York, 1855.

31. Денисов Н. Я. Строительные свойства лесса и лессовых пород. - М.: Госстройиздат, 1953.-с.175.
32. Department of transport. Reinforced Earth Retaining Walls for Embankment including Abutments, Tech. Mem. BE (Interim), Dept. of Environment, Highways Lirectorate, 1977.
33. Детье Ж. Возвращение к традициям. Курьер ЮНЕСКО, № 4,1985. с. 31-34.
34. Джоунс Д. К. Сооружения из армированного грунта. Стройиздат. М.: перевод с английского: 1989. - 280 с.
35. Зуев С.С., Тимофеев М.А., Селетков С.Ф., Маковецкий О.А. Анализ изменения гидрогеологической ситуации при устройстве геотехнического барьера комплекса «СМАРТ-ПАРК-УФА»// Жилищное строительство. 2015.№9 стр. 16...20.
36. Ierner M. Z., Ioop L. Z. Stiffness and Deflection analysis of complex structures. g. aero. Sci. 23. 1956.
37. Исаков А. Л., Григоращенко В. А., Плавских В. Д., Земцова А. Е. Экспериментальные исследования деформирования грунтовых оснований, армированных стержневыми элементами. ж. “Основания, фундаменты и механика грунтов” №2, М.: Стройиздат, 1998. с. 14 - 16
38. Ильичев В.А. Свайные фундаменты в сейсмических районах/В.А. Ильичев, Ю.В. Монголов, В.М. Шаевич, М.: Стройиздат, 1983. - с.144.
39. Copplestone. T. World Architecture. Hamlyn, Feltham, 1963.
40. Кригер Н. И., Кузнецов А. Г., Мунц О. И. Косвенные методы оценки просадочных свойств лессовых пород. Труды ПНИИС. – М.: Стройиздат, 1971 т.12. – с. 191-260.
41. Кригер Н. И. Лесс, его свойства и связь с геологической средой. – М.: 1986 – 296 с.
42. Крутов В. И., Попсуенко И. К. Устранение просадок лессовых грунтов от их собственного веса путем армирования лессовой толщи. ж. “Основания, фундаменты и механика грунтов” №3, М.: Стройиздат, 1976. с. 17 - 19.
43. Крутов В. И. Основания и фундаменты на просадочных грунтах. Киев, Будивельник, 1982, - 224 с.
44. Кадыров Э.В. Лессовые породы: происхождение и строительные свойства. – Ташкент.: Узбекистан, 1979. – 166 с.
45. Крутов В.И., Попсуенко И.К. Расчет армированных массивов. Труды института. Вып. 70. Стройиздат, М, 1980.
46. Крутов В. И. Основания и фундаменты на просадочных грунтах. Киев, Будивельник, 1982, - 224с
47. Кригер Н. И. Лесс, его свойства и связь с геологической средой. – М.: 1986 – 296с.
48. Кузнецов А. А., Нуждин Л. В., Писаненко В.П. Экспериментальные исследования работы армированного вертикальными элементами основания в пространственном лотке. Изв. вузов. Строительство. 2000. №2 – 3. с. 135 – 137.
49. Ларионов А.К. Лессовые породы и их строительные свойства. – М.: Госгеолиздат, 1959, - 363 с.
50. Лукашев К. И. Проблема лессов в свете современных представлений. – Минск.: Издательство АН БССР. 1961.
51. Munster A. United States Patent Specification No. 1762343, 1930.
52. Мавлянов Г. А. Генетические типы лессов и лессовидных пород центральной и южной частей Средней Азии и их инженерно-геологические свойства–Ташкент. Изд. АН Уз ССР, 1958.
53. Мусаэлян А.А., Вильфанд А.Г., Нутова Л.В. и др. Опыт строительства на просадочных грунтах в сейсмических районах Тадж. ССР и пути его совершенствования. – Основания, фундаменты и механика грунтов, 1972, №6.–с. 9-10.
54. Марков А.И., Клепиков С.П., Гупаленко В.И. Определение напряженно-деформированного состояния просадочных грунтов во взаимодействии с уплотненными массивами. В сборнике “Фундаментостроение в сложных грунтовых условиях”, Алма-Ата, 1977.
55. Малышев М. В. Прочность грунтов и устойчивость основания сооружений. М., 1980.
56. Mithell I.K., Koitti R.K. Soil impravement state of the art report XICSMFE. Stockholm. 1981.
57. Мотузов Я.Я., Горлов В.С., Котов А.И. Технология изготовления илцементных свай и область их применения. - В кн.: “Применение цементогрунта в фундаментостроении. “Тезисы докладов Всесоюзного совещания”. М.: Стройиздат, 1984. - с.44-46.
58. Мустафаев А.А. Расчет оснований и фундаментов на просадочных грунтах. – М.: Высшая школа, 1979. – 368с.
59. Мустакимов В. Р. Закономерности ползучести увлажняемых лессовых грунтов. Расчет и проектирование строительных конструкций с применением ЕСЭВМ. Сборник научных трудов.ТашПИ.Ташкент.1987,с.6-9.
60. Мустакимов В. Р. Цементогрунт модифицированный АЦФ-3М-65. Курилиш аше-буюмлари технологиясининг самарадорлигини ошириш. (Анжуман якуни буйича илмий маколалар туплами, 12-14 апрел, 1995й.) Сам ГАСИ, Самарканд, 1995г., с.134-136.
61. Мустакимов В. Р. Разработка бурсмесительного способа устройства свай в грунтах второго типа по просадочности. Диплом I-й степени. ВДНХ Узбекской ССР. № 4, 10 мая 1990 года, Ташкент, с.1-2.
62. Мустакимов В. Р. К вопросу закрепления лессовых грунтов Самарканда цементом. Сборник тези-

- сов докладов. I-я Региональная конференция СНГ. Строительство на структурно-неустойчивых грунтах. Сам ГАСИ им. М. Улугбека. Самарканд. 1992, с. 23-24.
63. Мустакимов В. Р., Хасанов А.З., Икрамов Ф.А. Способ армирования оснований сложенных из структурно-неустойчивых грунтов. Сборник тезисов докладов. I-я Региональная конференция СНГ. Строительство на структурно – неустойчивых грунтах. Сам ГАСИ им. М. Улугбека. Самарканд. 1992, с. 194-195.
 64. Мустакимов В. Р., Хасанов А. З., Икрамов Ф. А. Исследование грунта, армированного вертикальными элементами. Результаты научно-практических исследований в новых экономических условиях. (Сборник тезисов докладов XXVII научно – практической конференции профессорско-преподавательского состава СамГАСИ.). Посвященная 660-летию Амира Темура. СамГАСИ, Самарканд. 1996. с . 55.
 65. Мустакимов В. Р., Хасанов А. З., Ханкельдиев М. М. К вопросу вертикального армирования оснований зданий и сооружений на примере структурно-неустойчивых грунтов Самарканда. Результаты научно-практических исследований в новых экономических условиях. (Сборник тезисов докладов XXVII научно-практической конференции ПП СамГАСИ.). 660-лет А.Темуру. СамГАСИ, Самарканд. 1996. с . 56.
 66. Мустакимов В.Р., и др. Экспериментальные модельные испытания грунтов, армированных вертикальными армоэлементами в лотке. Исследование прочностных и деформационных характеристик цементогрунта. Разработка новых расчетных моделей сейсмостойких, конструктивных систем, разработка методов, алгоритмов и программ расчета зданий и сооружений, их оснований и подразделений. Узбекистан. Р/№01970004443, №149/6, 1997, ВНИИЦентр, №02970003206, Самарканд., 1999.
 67. Мустакимов В. Р., Мирсаяпов И. Т. Совершенствование расчета грунта основания, армированного вертикальными элементами. Международная научно-техническая конференция «Геотехника Беларуси: наука и практика». «Будаўніцтва-строітельство-construction» №1-2, БНТУ, Минск. 2003, с. 131-145.
 68. Мирсаяпов И.Т., Мустакимов В.Р. Напряженно-деформированное состояние, прочность и деформативность просадочных грунтов оснований, армированных вертикальными элементами Труды международной научно-практической конференции по проблемам механики грунтов и фундаментостроению. Том I и Том II. ПГТУ. Пермь, 2004. с. 122-128
 69. Мирсаяпов И.Т., Мустакимов В. Р. Алгоритм расчета геомассивов. Актуальные проблемы проектирования и устройства оснований и фундаментов зданий и сооружений. Сборник научных статей. Пенза, 2004., с. 167-171.
 70. Мустакимов В. Р. Прочность и деформативность просадочных грунтов оснований, армированных вертикальными армоэлементами. - М.: МГСУ, Диссерт. на соиск. уч. ст. кандидата техн. наук. 2004. - 24с.
 71. Мустакимов В. Р. Исследование просадочных грунтов, армированных вертикальными элементами. Монография. Издатель: LAP LAMBERT Academic Publishing. Германия, 2016, 95 с.
 72. Малинин А. Г., Малинин П. А. Повышение несущей способности грунтоцементных свай с помощью гидроразрыва // Подземное пространство мира, 2001, №5-6.
 73. Мангушев, Р.А. Методы подготовки и устройства искусственных оснований / Р.А. Мангушев, Р.А. Усманов, СВ. Ланько. М.: АСВ, 2012. - 280с.
 74. Moseley, M.P. et.al. Ground improvement. – London. - 2004.- p.440.
 75. Маковецкий О.А. Устройство системы вертикальных и горизонтальных геотехнических барьеров при строительстве высотных зданий на слабых грунтах/Маковецкий О.А., Зуев СС., Тимофеев М.А., Селетков С.Ф., Травуш В.И. // Жилищное строительство.2016. №9 стр. 40...44.
 76. Pasley C. W. Experiments on Revetments Vol. 2, Murray, London, 1822.
 77. Основания, фундаменты и подземные сооружения/М. И. Горбунов-Посадов, В. А. Ильичев, В. И. Крутов и др.; Под общ. ред. Е. А. Сорочана и Ю. Ф. Трофименкова. - М.: Стройиздат, 1985.- 480 с., ил. - (Справочник проектировщика).
 78. Pasley C.W. Experiments on Revetments Vol. 2, Murray, London, 1822.
 79. Попов И. В., Танкаева Л. К. Исследование природы структурных связей в лессах. – Вестник МГУ, № 1. 1961.
 80. Попсуенко И.К. Исследование взаимодействия уплотненных массивов лессовых грунтов с окружающим их лессовым грунтом естественной структуры при просадке его от собственного веса. Автореферат диссертации на соиск. Уч. степ. канд. техн. наук. НИИОСП, М. 1977.
 81. Reed F.H. United States Patent No. 77699, 1904.
 82. Ручьев А.П., Толкачев П.И., Телина Л.Н., Тарасов М.В. Устройство грунтобетонных свай. - М.: Стройиздат, 1968.
 83. Rawasaki T. etc. Deep Mixing Method Using Cement Hardening Agent. Proc. XI International Confer-

- ence on Soil Mechanics and Foundation Engineering, San-Francisco, A.A.Balkema /Rotterdam/ Boston, 1985, p. 721-724.
84. Рекомендации по проектированию и устройству фундамента из цементогрунта.-М.: НИИОСП им. Н.М.Герсеванова, 1986.-71с.
 85. Reed F.H. United States Patent No. 77699, 1904.
 86. Сергеев Е. М. Генезис лессов в связи с их инженерно-геологическими особенностями. – Вестник МГУ, сер. 4, Геология, 1976, № 5, - с. 3-15.
 87. Сорочан Е.А. Вопросы совершенствования фундаментов на естественном основании. – Основания, фундаменты и механика грунтов, 1977, №5, с. 9-12.
 88. Saran S., Talevar D.V. and Prakesh S. Earth pressure distribution on Retaining Wall with Reinforced Earth Backfill, Int. Conf. Soil Reinforcement, Paris,1, 1979.
 89. Сорочан Е.А. Фундаменты промышленных зданий. М, 1986.
 90. Смолин Б.С., Шароватов В.И. Цементогрунтовые сваи, изготавливаемые буромесительным способом, в строительстве. - В кн. “Применение цементогрунта в фундаментостроении.” Тезисы докладов Всесоюзного совещания. М.: Стройиздат, 1984. - с.55-59.
 91. Малинин А. Г. Струйная цементация грунтов. – М.: ОАО «Издательство «Стройиздат», 2009. – 196 с.
 92. Токин А.Н., Яковлева В.А., Погорельская К., Розеншайн Д., Коломатцев Л. Сборные фундаменты из цементогрунта. - Сельское строительство. 1969, №5.
 93. Токин А.Н. Проектирование состава цементогрунта для изготовления блоков. -тр. ин-та/КСХИ, 1973, №67(95).
 94. Токин А.Н. Буромесительный метод устройства фундаментов из цементогрунта. “На стройках России”, 1980, № 1. -с.5-6.
 95. Токин А. Н., Мотузов Я. Я., Ветштейн А. И. А.С. № 663779 (СССР) /Способ изготовления цементогрунтовых свай/. 14/IV-1981 г. № 3279827 / 29-33 (O57O73).
 96. Токин А. Н. Фундаменты из цементогрунта.-М.: Стройиздат, 1984.-184с.
 97. Terashi M. Grount Improved by Deep Mixing Method. Proc. Tena.-XI International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, San-Francisco, A.A.Balkema /Rotterdam/ Boston, 1985, p. 777-780.
 98. Токин А. Н., Шапошников А. В. Закрепление грунтов буромесительным способом. Сб. научн. трудов НИИОСП, “Ускорение научно-технического прогресса в фундаментостроении” т.І. Новейшие методы исследования строительных свойств грунтов, прогрессивные способы возведения фундаментов и устройства оснований. - М.: Стройиздат, 1987. с.254-255.
 99. Токин А. Н., Мустакимов В. Р. Лессовые породы Узбекистана и возможности их закрепления. Сборник тезисов докладов. I-я Региональная конференция СНГ. Строительство на структурно-неустойчивых грунтах. Сам ГАСИ им. М. Улугбека. Самарканд. 1992, с. 20-22.
 100. Тимофеева Л.М. Армирование грунтов. Дис...д-ра техн. наук: 05.23.02/ Тимофеева Людмила Михайловна. М.: МИСИ,1992. – с. 9. Moseley, M.P. et.al. Ground improvement. – London. - 2004.- p.440
 101. Haas R.H. and Weller H.E. Bank stabilization by revetments and dykes, Trans. A.S.C.E., col. 118, No. 2564, 1952.
 102. Hughes I.O., Witherst N.I. Reinforcing of soft cohesive with ston columus. “Ground Eng.” 1974, 7 №3.
 103. Hughes Ihomas I.R., Prevost Gens H. Finit element solution of boundory valuc problems in soil mechanics. Swonseа. 1980. vol.1.
 104. Heins Priebe Absehatzungdes Setrung Sverhaltens lines durch Stopfverdichtung verbesserten Baugrundes “Die bautechir”, 1976, №5.
 105. Holts, Robert D. Special applications. [Основные случаи применения армирования грунтов] Symp Earth Reinf. Pitsburgh. 1978.
 106. Hughes I.O., Witherst N.I. Reinforcing of soft cohesive with ston columus. “Ground Eng.” 1974, 7 №3.
 107. Hughes Ihomas I.R., Prevost Gens H. Finit element solution of boundory valuc problems in soil mechanics. Swonseа. 1980. vol.1.
 108. Хасанов А.З., Икрамов Ф.А., Мустакимов В.Р. Причины повреждения эксплуатируемых зданий, построенных на лессовых просадочных грунтах Средней Азии Сборник научных статей по итогам XXV конференции. Научно-теоретические и практические исследования ученых СамГАСИ им. М. Улугбека. Самарканд.1992, с. 31-38.
 109. Хасанов А.З., Стриго Г.С., Мустакимов В.Р. Деформации кирпичных зданий на просадочных грунтах Зерафшанского оазиса. «Основания, фундаменты и механика грунтов», ж. № 6, М.: 1993, с. 23-26.
 110. Khasanov A.Z., Strigo G.S., Mustakimov V.R. Deformations of brick bildings on collapsing soils of the Zeravhan oasis. Soil mechanics and foundation engineering. Основания, фундаменты и механика грунтов. (Osnovaniya, fundamenti i mekhanika gruntov). Translaned from Russian. Consultants Bureau, New York Vol.30, № 6, pp.251-255, November-December, 1993. May, 1994.

111. Хасанов А.З., Стриго Г.С., Мустакимов В.Р., Гаппаров Р.М. Опыт выпрямления наклонившегося минарета в сейсмически активном регионе. Марказий Осиё шароитида бино ва иншоотларнинг зилзилабардошлиги муаммолари (анжуман якуни бўйича илмий мақолалар туплани) 27-29 апрел, 1994 й., Сам ДМКО, Самарканд, 1994, 61-63 бет.
112. Хасанов А.З., Мустакимов В.Р., Икромов Ф.А., Гаппаров Р.М. Архитектурные памятники Узбекистана и инженерно-геологическая среда. «Основания, фундаменты и механика грунтов», ж. № 4, 1997, Москва, Стройиздат, с. 22-25.
113. Khasanov A.Z., Mustakimov V.R., Ikramov F.A., Gapparov R.M. Architectural monuments of Uzbekistan and the geologic-engineering mediam. Soil mechanics and Foundation Engineering. Основания, фундаменты и механика грунтов. (Osnovaniya, fundamenti i mekhanika gruntov). Translated from Russian. Consultants Bureau, New York Vol. 34 No. 4, pp. 126-129, July-August, 1997. January, 1998. Translated from Osnovaniya, Fundamenti i Mekhanika Gruntov, № 4. Pp. 22-25, July-August, 1997.
114. Хасанов А.З., Мустакимов В.Р., Гаппаров Р.М. Мухандислик-геология мухити ва тарихий едгорликлар асослари деформациланиши камайтиришнинг замонавий усуллари. «Архитектура и строительство Узбекистана», ж. № 3-4, 1997, Ташкент, с. 42 - 43.
115. Хасанов А. З., Зайналов Н. Р., Мустакимов В. Р. Расчет несущей способности грунтоцементных свай в основании, сложенном лессовыми просадочными грунтами. I Центрально-Азиатский геотехнический симпозиум. Астана, 25-28 мая, 2000.
116. Хасанов А. З., Мустакимов В. Р. Приближенный метод определения напряжений в грунте вокруг вертикального армоэлемента. Усиление оснований и фундаментов аварийных зданий и сооружений. Материалы Международной научно-практич. конференц.- Пенза, 2000, с. 176–178.
117. Хасанов А. З., Мустакимов В. Р. Теоретические исследования НДС основания, армированного вертикальными элементами. Материалы второго межрегионального научно-практического семинара. Эксплуатация и реконструкция зданий. МОРФ ЧГУ, СФ. Чебоксары, 2001, с. 109-115.
118. Fraser J.B. A steel-faced rockfill dam for Papua, Trans. Inst. of Engrs. Australia, CE4, 1962.
119. Forsyth R.A. Alternative earth reinforcements, ASCE Symp. Earth Rittsburgh, 1978.
120. Федоровский В. Г., Безволев С. Г. Метод расчета свайных полей и других вертикально армированных грунтовых массивов. ж. “Основания, фундаменты и механика грунтов” №3, М.: Стройиздат, 1994. с.11-15.
121. Шадунц К. Ш., Ветштейн А. И. Исследование технологий устройства фундаментов из цементогрунтовых свай. Сб. научн. труд. НИИОСП, “Ускорение научно-технического прогресса в фундаментостроении” т.I. Новейшие методы исследования строительных свойств грунтов, прогрессивные способы возведения фундаментов и устройства оснований. М.: Стройиздат, 1987. с.273-274.
122. Шапошников А.В. Разработка расчетных параметров закрепления просадочных грунтов цемент-буро-смесительным способом. -М.: НИИОСП им. Н.М.Герсеванова, Диссерт. на соиск. уч. ст. кандидата техн. наук. 1986.-192с.
123. Штоль Т.М., Теличенко В.И., Феклин В.И. Технология возведения подземной части зданий и сооружений: Учеб пособие для вузов: Спец.: «Пром. и гражд. Стр-во».-М.: Стройиздат, 1990.-288 с.
124. Швецов Г.И., Носков И.В., Слободян А.Д., Госькова Г.С.: под ред. Швецова Г.И. Основания и фундаменты: Справочник. М.: Высшая школа 1991. -383с.
125. Yamanochi T. Structural effect of restrained layer on subgrade of low bearing capacity in flexible pavements, Proc. 2nd Int. Conf. Structural Design of Asphalt Pavements, Ann Arbor, 1967, pp 381-9.

Ключевые слова:

Просадочный, структурно-неустойчивый, замачивание, просадка, армоэлемент, структурный геомассив, буросмесительный, цементация, силикатизация, струйная геотехнология, геосетка, георешетка, термическое упрочнение, термосвая.

Оглавление

Предисловие.....	3
Введение.....	4
Глава 1. Общие сведения о просадочных грунтах и их упрочнения армированием...	5
1.1. Особенности и строительные свойства лессовых просадочных пород и способы строительства на них.....	5
1.2. Концепции армирования грунтовых массивов вертикальными элементами.	9
1.3. Становление и развитие концепции армирования грунтов.....	9
1.4. Современные концепции армирования грунтов.....	11
1.5. Геомассив из вертикально армированного структурно-неустойчивого грунта.....	16
Глава 2. Научно-теоретические исследования напряженно-деформированного состояния просадочных грунтов, армированных вертикальными элементами.....	21
2.1. Постановка задачи.....	21
2.2. Результаты экспериментально-теоретических исследований.....	22
2.3. Научная новизна и актуальность.....	22
2.4. Научно-теоретические исследования.....	22
2.5. Предпосылки к теории расчета стесненной просадки.....	23
2.6. Основные функции прочности и деформативности вертикально армированного грунтового основания.....	24
2.7. Напряженно-деформированное состояние армированного вертикальными элементами просадочного грунтового массива.....	25
2.8. Алгоритм расчета просадочного массива грунта, армированного вертикальными элементами по I-ой (прочности) и II-ой (деформациям) группам предельных состояний.....	32
Глава 3. Экспериментальные исследования НДС просадочных грунтов, армированных вертикальными элементами.....	34
3.1. Результаты экспериментальных исследований.....	36
Выводы.....	40
Список библиографических ссылок.....	42

Мустакимов Валерий Раифович

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Архитектура» КГАСУ

В 1977 г. окончил строительный факультет Самаркандского Государственного архитектурно - строительного института имени Мирзо Улугбека (СамГАСИ). Специалист в области проектирования и инженерного обследования оснований, фундаментов и строительных конструкций зданий и сооружений в обычных и особых инженерно-геологических и природно-климатических условиях. С 1999 г. по сей день работает в Казанском Государственном архитектурно-строительном университете (КГАСУ). В течение этого периода, по совместительству, работал главным специалистом по строительным конструкциям в ГУП «Татинвестгражданпроект». Более 40 лет творческой жизни посвятил проектированию и исследованию объектов гражданского назначения, возводимых на структурно-неустойчивых (просадочных) грунтах в условиях сухого и жаркого климата Средней Азии. В течение этого периода, занимался проектно-изыскательской и научной работой в Самаркандском филиале УзНИИП градостроительства и ПЭМ СамГАСИ, последовательно занимая должности от инженера до главного инженера организаций и заместителя начальника ПЭМ СамГАСИ по науке.

В. Р. Мустакимов является автором более 50 научных работ, одной монографии, 7 патентов на изобретения, 5 учебных пособий и 12 методических указаний в области оснований, фундаментов, подземных сооружений, архитектуры и строительства зданий и сооружений. Член Российского общества механики грунтов геотехники и фундаментостроения (РОМГГиФ), IGS, Международной объединенной академии наук (МОАН).

SPLN 001-000001-5329-MK

ISBN 978-5-6042088-8-5

9 785604 208885