

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ЗАКРЕПЛЕНИЯ ГРУНТОВЫХ МАССИВОВ ПОД НИЖНИМ КОНЦОМ СВАЙНЫХ ФУНДАМЕНТОВ И ВОКРУГ ГЛУБОКИХ КОТЛОВАНОВ

Н. В. Купчикова, Ю. А. Готман***

*Астраханский государственный архитектурно-строительный университет (г. Астрахань)
ООО «Подземпроект» (г. Москва)*

В статье представлены результаты экспериментальных, численных и аналитических исследований закрепления грунтовых массивов под нижним концом свайных фундаментов и вокруг глубоких котлованов. Оптимизация закрепления грунтовых массивов под нижним концом конструкций свай в фундаментах глубокого заложения и вокруг глубоких котлованов с оптимизационными алгоритмами определения правильности геометрической формы (объёма) закрепляемого массива, количество твердеющего состава в сухом состоянии, содержащегося в 1 м³ укреплённого грунта, шаг свай в группе и методика вычисления размеров грунтоцементного массива вокруг глубоких котлованов по полученному оптимальному решению позволили выявить эффективность технологических и конструктивных решений сложных геотехнических задач, направленных на устранение недопустимых осадок и деформаций фундаментов и подземной части сооружений, эксплуатируемых в сложных инженерно-геологических условиях.

Ключевые слова: *свайный фундамент с концевыми уширениями, численные исследования, эксперимент, метод конечных элементов, оптимизация параметров закрепления, грунтовый массив, физико-механические характеристики*

THE EFFECTIVENESS OF CONSOLIDATION OF SOIL UNDER THE LOWER END OF PILE FOUNDATIONS AND DEEP EXCAVATIONS AROUND

N. V. Kupchikova, J. A. Gotman***

*Astrakhan state University of Architecture and Civil Engineering (Astrakhan)
ООО "Podzemproekt" (Moscow)*

The article presents the results of experimental, numerical and analytical studies of fixing soil massifs under the lower end of pile foundations and around deep pits. Optimization of fastening of soil massifs under the lower end of pile structures in the foundations of deep foundations and around deep pits with optimization algorithms for determining the correctness of the geometric shape (volume) of the fixed array, the amount of hardening composition in the dry state contained in 1 m³ of fortified soil, the step of the piles in the group and the method of calculating the size of the soil-cement massif around the deep pits on the obtained optimal solution allowed to identify the effectiveness of technological and constructive solutions to complex geotechnical problems, aimed at eliminating unacceptable sediments and deformations of foundations and underground structures operated in complex engineering-geological conditions.

Keywords: *pile foundation with end widenings, numerical studies, experiment, finite element method, optimization of fastening parameters, soil mass, physical and mechanical characteristics*

Значительные территории нашей страны сложены слабыми грунтами, способными изменять под нагрузками свои строительные свойства и негативно влиять на эффективную работу сооружений в период эксплуатации. Освоение подземного пространства в большинстве случаев требует закрепления грунтовых массивов при соблюдении требований экономии природных и финансовых ресурсов.

Анализ практического опыта закрепления грунтовых массивов вокруг подземных сооружений и под фундаментами глубокого заложения показывает [1-26], что наиболее эффективными является нагнетание маловязких растворов для химического или физико-химического связывания частиц грунта и струйная геотехнология. Разработанные способы закрепления слабых грунтов инъектированием подразделяют по способам нагнетания, по составу растворов и характера закрепления грунта, по расположению инъекторов (вертикальное, горизонтальное, наклонное, комбинированное [2,5-10]). Находясь в грунте растворы, вступают в химическую реакцию с грунтом и, отверждаясь в нём, улучшают химические свойства основания. Сущность струйной технологии заключается в использовании энергии высоконапорной струи

цементного раствора для разрушения и одновременного перемешивания грунта с цементным раствором. После твердения раствора образуется новый материал - грунтобетон, обладающий высокими прочностными и деформационными характеристиками, или полное замещение материала с заданными свойствами - [4].

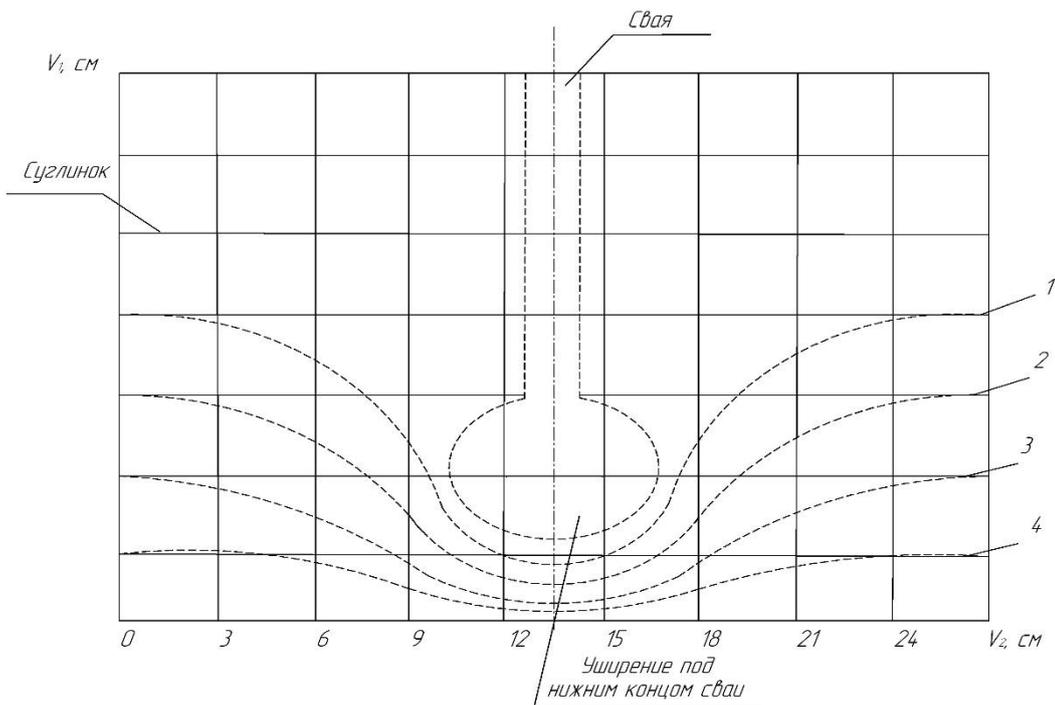
Однако до настоящего времени в научной литературе и нормативной документации отсутствуют научно-обоснованные предпосылки построения расчётной модели взаимодействия систем «грунт-свая-уширение» и «подземное сооружение-грунтовый массив», что не позволяет определять оптимальные параметры закрепления грунтовых массивов (правильность геометрической формы закрепляемого массива, количество твердеющего состава в сухом состоянии, содержащегося в 1 м³ укреплённого грунта, шаг свай в группе и др.) [3]. Экономия природных ресурсов при закреплении грунтовых массивов возможна на основе оптимального проектирования подземных конструкций, что является малоизученной областью и практически не рассматривалось как в российской, так и зарубежной практике. Поэтому исследования с применением методов теории оптимизации для опре-

деления параметров закрепления позволят повысить эффективность использования дорогостоящей технологии при разработке прогрессивных технических решений устройства подземного пространства в городской среде.

Оценка параметров закрепления грунтовых массивов осуществлялась при комплексном подходе на основе математического, физического моделирования результатов наблюдения экспериментальных данных. [4-6].

Экспериментальные исследования в данной работе по химическому закреплению грунтов под нижним концом свайных фундаментов в лабораторных условиях и на натурных моделях проводились с помощью цементации, силикатизации и битумизации с применением пластифицирующих и модифицирующих добавок как для одиночной конструкции, так и для группы свай. По длине свай в центре сечения было устроено отверстие, в которое вставлена металлическая трубка для подачи нагнетающих составов строго по центру нижнего конца конструкций свай. После погружения сваи вдавливанием до проектной отметки под давлением через внутреннюю трубу сваи подавался цементный раствор, жидкое стекло и жидкий битум, разжиженный в керосине. Наиболее важными параметрами, определяющими конечную эффективность закрепления грунта, является правильность геометрической формы и количество твердеющего состава в сухом состоянии, содержащегося в 1 м^3 укрепленного грунта. Последний параметр определяет прочность материала

концевого уширения сваи. Отслеживалось В/Ц отношение закачиваемого ЦР, при котором раствор обладает достаточной подвижностью и одновременно формирует прочную цементно-грунтовую массу с пластифицирующими и модифицирующими добавками и время твердения образцов. В ходе исследования наряду с цементным раствором применяли следующие добавки: суперпластификатор С-3, Sodium formate, БЕНО-ТЕХ, пластификатор «Линамикс», «АрмМикс», «Майти 100» и др. Наиболее подробно технология проведения экспериментальных исследований по закреплению грунта под нижним концом свайных фундаментов в лабораторных и натуральных условиях представлены в работах [6-10]. В эксперименте использовали жидкие нефтяные битумы класса СГ 40/70 и СГ 70/130, приготовленные путем разжижения вязких битумов керосином. В грунтовом лабораторном лотке со стеклянной стенкой для визуализации окрашенных линий грунта вокруг конструкции сваи фотофиксировали осадку после вертикального нагружения и горизонтального. На рис. 1. представлены изолинии плотности грунта под нижним концом модели сваи с уширением, образованным в результате цементации с пластифицирующей добавкой С-3 с поэтапным их изменением в результате вертикального нагружения. Пластификатор С-3 вводился в цементный раствор в количестве 0,3-1% сухого вещества по отношению к массе цемента.



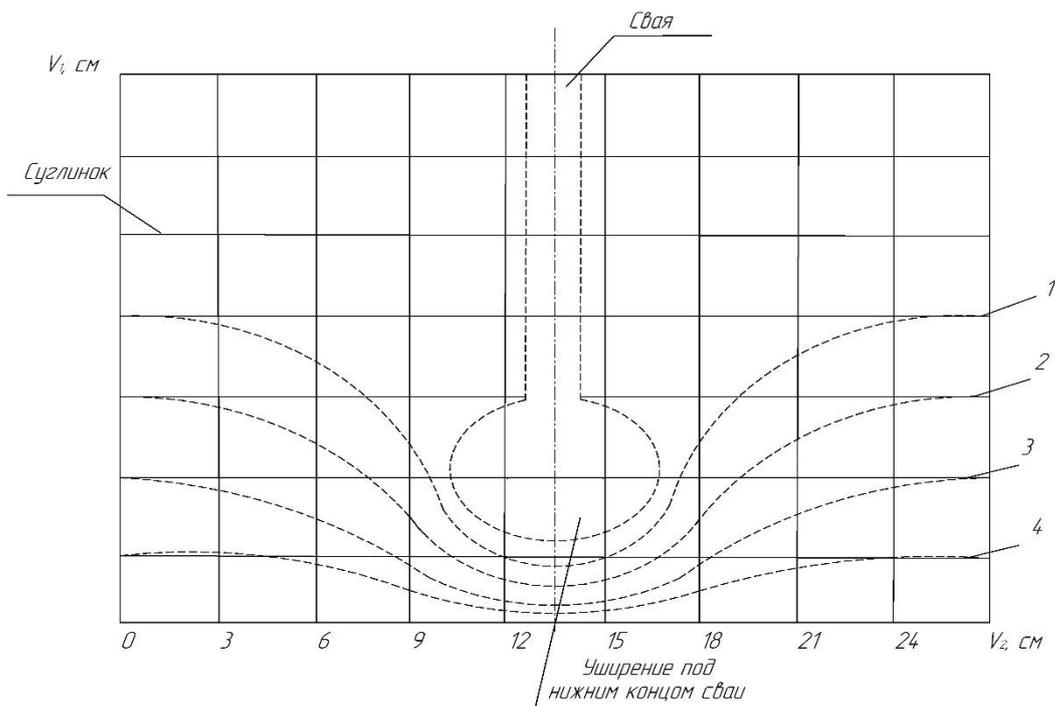
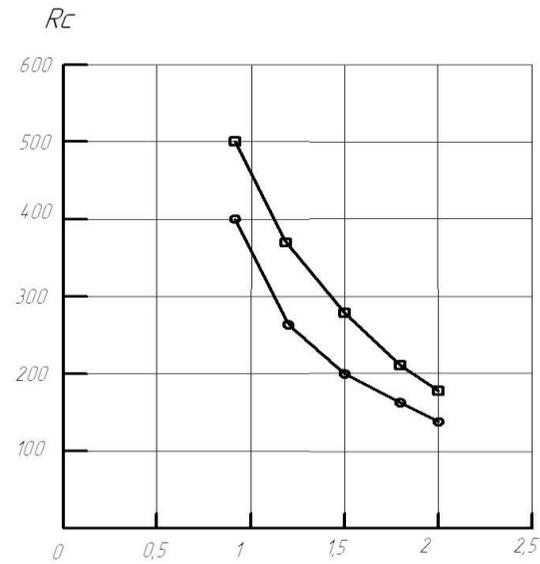
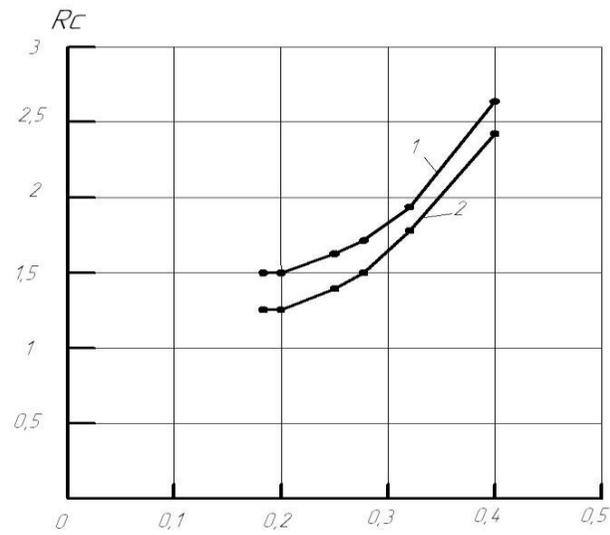


Рис. 1. Горизонтальные изолинии (1,2,3,4) перемещения грунта при вертикальном нагружении модели сваи с закреплённым суглинком под нижним концом путём цементации

Экспериментальные исследования для групп свай проводили по аналогии. В ходе эксперимента для группы свай варьировали шаг свай и объёмом закачиваемого раствора для образования зон пересечения концевых уширений. Шаг свай в группе варьировали с расстоянием от 2-х до 6-ти диаметров свай. Диаметр уширения варьировался от 2-х до 4-х диаметров свай в зависимости от объёма закачиваемого раствора. Исследования изменения объёмной массы закреплённого грунта и сцепления грунта под нижним концом свайного фундамента проводили определением объёмных деформаций в основании сваи по изменению плотности грунта,

определением характера и величин перемещений грунта в пределах зоны деформаций с помощью закладываемых в грунт фиксаторов и визуально посредством вскрытого основания сваи с фотографированием видимых изменений (см. рис.2). На рис.3 показаны: графики зависимости прочности закреплённого грунта при нагнетании жидкого битума, разжиженного керосином класса СГ 40/70 (№2) и СГ 70/130 (№1) в зависимости от отношения объёма керосина к битуму; нарастание прочности концевое уширения под свайей, образованным цементацией при сжатии с применением С-3 по сравнению с прочностью бетона на обычном цементе в зависимости от водоцементного отношения.



Отношение битума к керосину (К/Б)

Рис. 3: а – прочность закреплённого грунта при нагнетании жидкого битума, разжиженного керосином класса СГ 40/70 (№2) и СГ 70/130 (№1); б - Нарастание прочности концевого уширения под сваей, образованным цементацией при сжатии с применением суперпластификатора С-3 по сравнению с прочностью бетона на обычном цементе в зависимости от водоцементного отношения



В табл. 1 указаны значения осадок сваи с упорочением под её нижним концом, полученные экспериментальным путём на действие горизонтальных и вертикальных нагрузок в результате цементации грунта с пластификатором С-3 и без неё.

Таблица 1

Характеристики образцов концевых уширений сваи, полученных в результате цементации грунта с добавкой С – 3

№ n	Водоцементное отношение (В/Ц)	Прочность полученного образца в результате цементации (Н/см ²)	Прочность полученного образца, в результате цементации с добавкой С -3 (Н/см ²)
1	2	3	4
1	2	140	180
2	1.8	152	200
3	1.5	200	275
4	1.2	260	360
5	1	400	500

Таким образом, наиболее оптимальным В/Ц отношением с добавкой С-3 является В/Ц более 0,8, что достаточно облегчит вкачивание цементной смеси.

Численный анализ проводили в результате моделирования с помощью системного численного изучения на основе решения в системе пре- постпроцессора FEMAP с решателем NE/NAS-TRAN (см. рис.4 и5).

Таблица 2

Осадка сваи с укрепленным грунтом под действием вертикальной нагрузки

№	Значение силы Р, Н	Значение осадки экспериментальное, мм	Значение осадки теоретическое, мм
1	280	0,02	0,0188
2	350	0,03	0,0235
3	500	0,04	0,0336

Выполнив сравнительный численный анализ загрузки базовой модели сваи и сваи с концевым уширением на одновременное действие горизонтальных и вертикальных нагрузок, получили изополя напряжений и перемещений базовой модели сваи и сваи с уширением,

образованным цементацией грунта с добавкой С-3, что показывает уменьшение данных показателей у сваи с концевым уширением. При этом осадка сваи с концевым уширением показала снижение по сравнению с нагружением конструкции без укрепленного грунта в 2 раза.

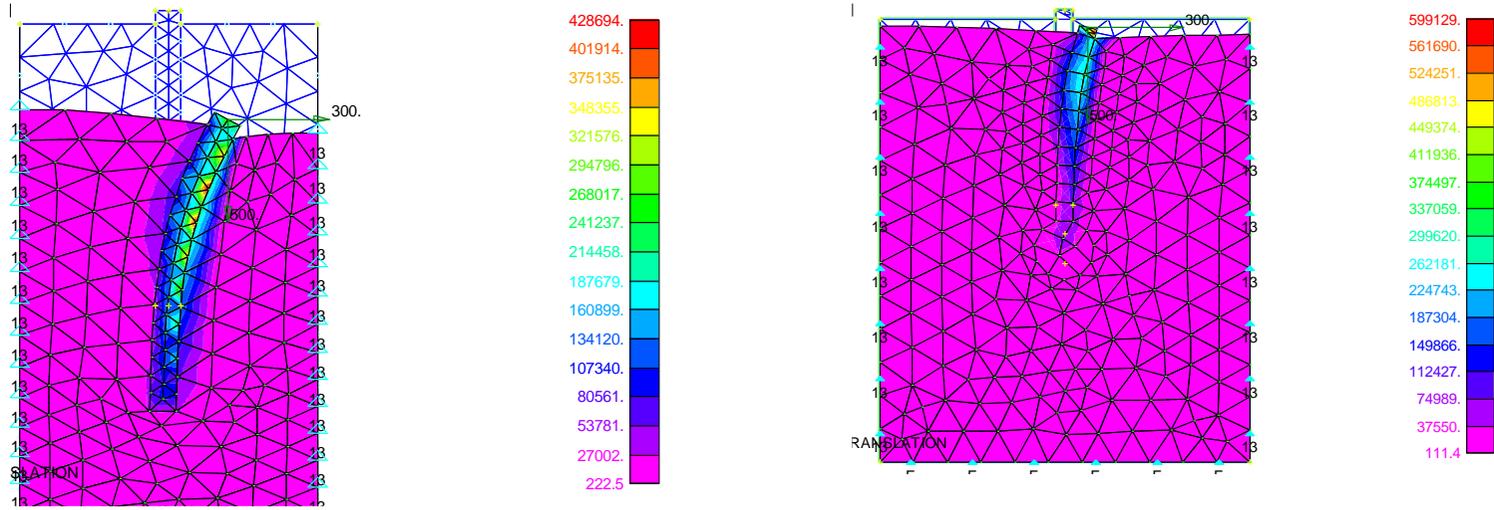


Рис. 4. Изополя перемещений базовой модели сваи и с концевым уширением от действия горизонтальной нагрузки 300 Н и вертикальной 500Н

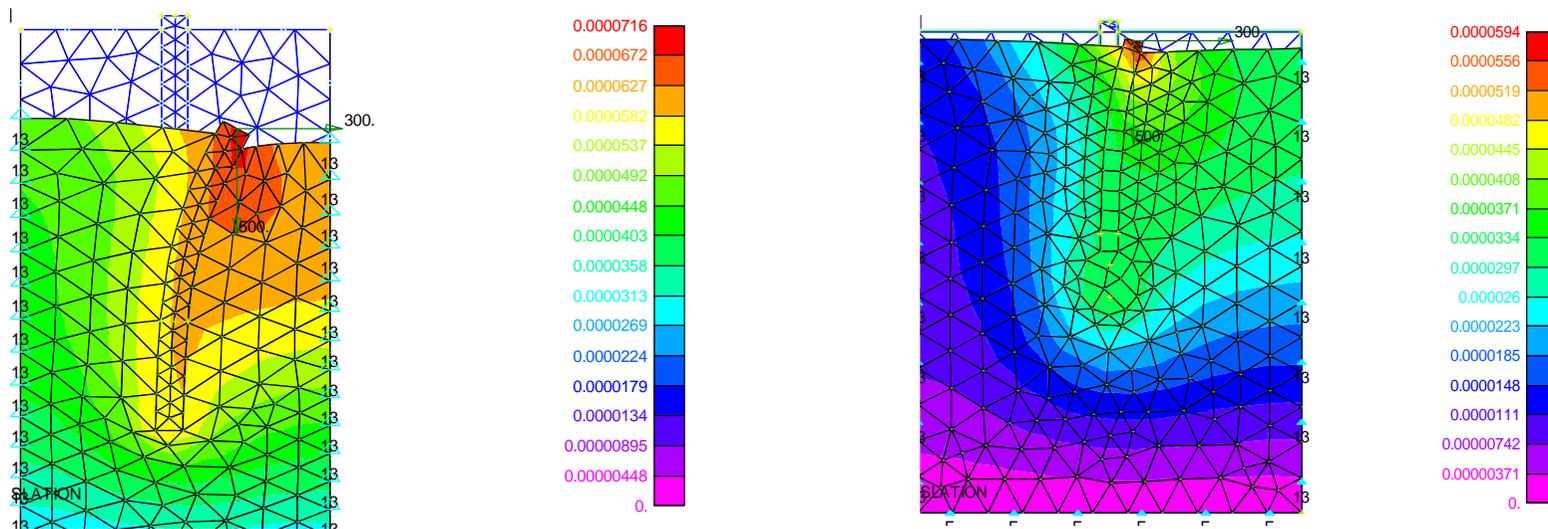


Рис. 5. Изополя напряжений базовой модели сваи и с концевым уширением от действия горизонтальной нагрузки 300 Н и вертикальной 500Н

В результате экспериментальных исследований и численного анализа можно наиболее точно отобразить и выполнить сравнение поведения систем «свая – грунт» и «грунт-свая-уширение». При этом выявлено, что характер пропитки цементным раствором с добавками грунта и прочность цементно-грунтовой массы слабо зависит от глубины её заложения, но в значительной степени зависят от физико-механических характеристик закрепляемого грунта. Результаты полученных испытаний свидетельствуют об эффективности повышения прочности грунта под нижним концом сваи за счёт нагнетания твердеющих составов, что позволило в 2011 году на строительной площадке г. Астрахани, расположенной по ул. Амурская строительной компанией «Инвест-строй» для возведения свайного фундамента здания трансформаторной и электрической подстанции на просадочных грунтах наиболее оптимально выполнить расчёт водоцементного отношения, давления нагнетания раствора, радиуса закрепления грунта под нижним концом сваи и расход цементного раствора и добавок на 1 м³ укрепленного объема грунта применён при способе

закрепления слабого основания - цементации с химическими добавками.

В последнее время всё интенсивнее закрепление грунтов в крупных мегаполисах производят с применением современной строительной технологии, которая называется струйной геотехнологией. Наиболее широко зарубежный и отечественный опыт струйной геотехнологии описан в работе И. И. Бройда [4], которая значительно отличается от других строительных технологий закрепления грунтовых массивов.

Экономия природных ресурсов при проектировании конструкций из грунтоцемента в системе «ограждение-ГЦМ-грунт» возможна на основе оптимального проектирования этих конструкций, что является малоизученной областью, поэтому исследования с применением методов теории оптимизации для определения объемов грунтоцемента позволят повысить эффективность использования дорогостоящей технологии при разработке прогрессивных технических решений устройства подземного пространства в городской среде.

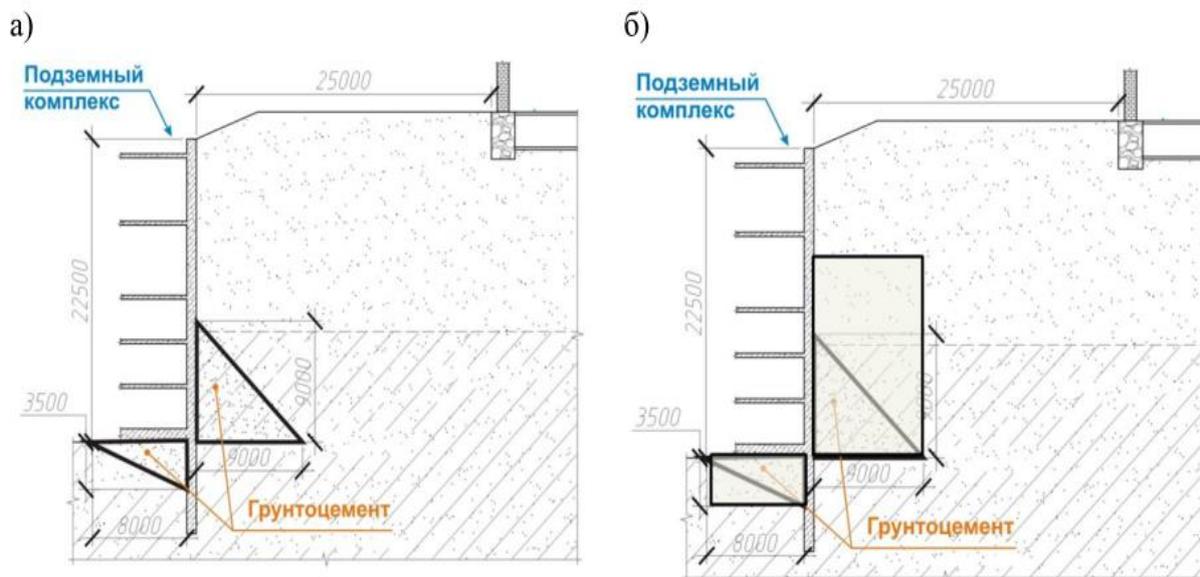


Рис. 6 Конструктивные схемы откопки котлована: а - «сверху вниз» с поэтапным устройством всех (5 уровней) промежуточных перекрытий; б - «сверху вниз» с устройством только одного верхнего перекрытия

В исследованиях были рассмотрены два расчётных случая:

1. Конструктивная схема откопки котлована: «сверху вниз» с поэтапным устройством всех (5 уровней) промежуточных перекрытий (см. рис. 6, а).

2. Конструктивная схема откопки котлована: «сверху вниз» с устройством только одного верхнего перекрытия (см. рис. 6, б).

В аналитическом решении определяли минимальный объем закрепления (область) грунта струйной технологией $V_{гц} \rightarrow \min$ при условии, что горизонтальные перемещения ограждения

дения при откопке котлована не превысят определенного заданного значения, т.е. $S_{\max}^{\text{гор}} \leq S_{\text{пред}}$ (рис.7). Для каждого расчетного случая рассматривалось три варианта расчета: вариант 1, без

грунтоцемента; вариант 2, с ГЦМ треугольной формы; вариант 3, с ГЦМ прямоугольной формы.

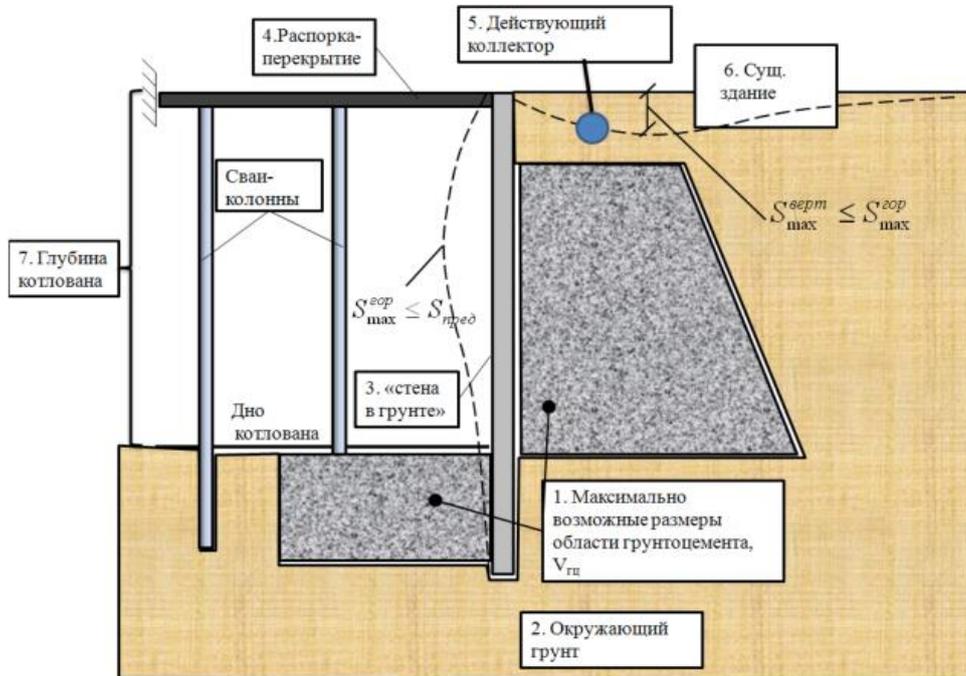


Рис. 7 Условия задачи в аналитическом решении определения минимального объема закрепления (область) грунта струйной технологией

Для анализа грунтоцемента снаружи котлована рассматривали 4 вариации –

V1, V2, V3, V4, показанные на рисунке 8,а. Форма грунтоцемента представляла собой прямоугольную трапецию, в которой варьировалось нижнее основание (V1..V4), а высота и верхнее основание оставались постоянными. Для анализа работы грунтоцементного массива ниже дна внутри котлована рассматривали также 4 вариации, показанные на рис. 8,б. Форма грунтоцементного массива представляли собой

прямоугольник, в котором варьировались ширина и высота. Для описания НДС ограждения при наличии примыкающего грунтоцементного массива в составе грунта принимали модель винклеровского основания, в которой коэффициент жесткости основания и был предметом оптимизации, как единственный параметр, характеризующий поведение системы «ГЦМ-грунт», а соответственно некоторым образом определяющий размеры ГЦМ.

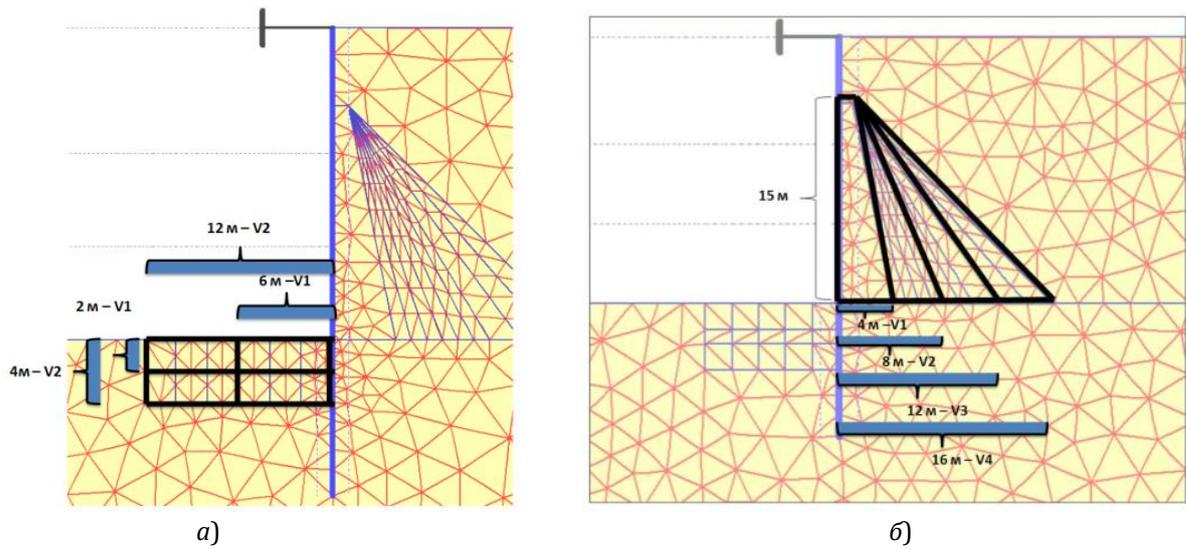


Рис. 8 Конечно-элементное моделирование формы грунтоцемента

Методика определения размеров ГЦМ по оптимальному коэффициенту жесткости подробно представлена в работе [13].

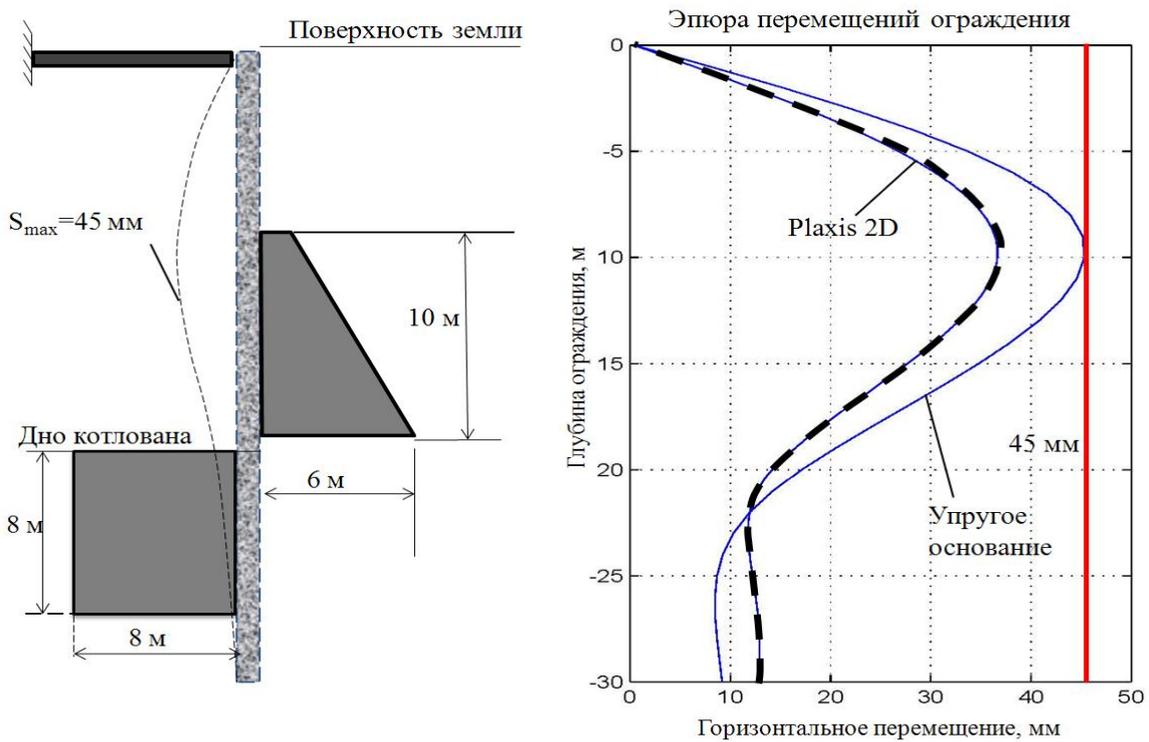


Рис. 9 Оптимальные размеры ГЦМ (в одном из примеров методики по оптимальному коэффициенту жесткости)

В результате составления поискового вычислительного алгоритма оптимального проектирования для расчетной модели, характеризующей систему «ограждение-ГЦМ-грунт», где предметом оптимизации является коэффициент жесткости основания, а основные ограниче-

ния накладываются на горизонтальные перемещения ограждения котлована определен модуль деформации грунтоцемента – 500 МПа, достаточный для применения разработанного метода в практических целях, а также отвечающий технологическим возможностям оборудования



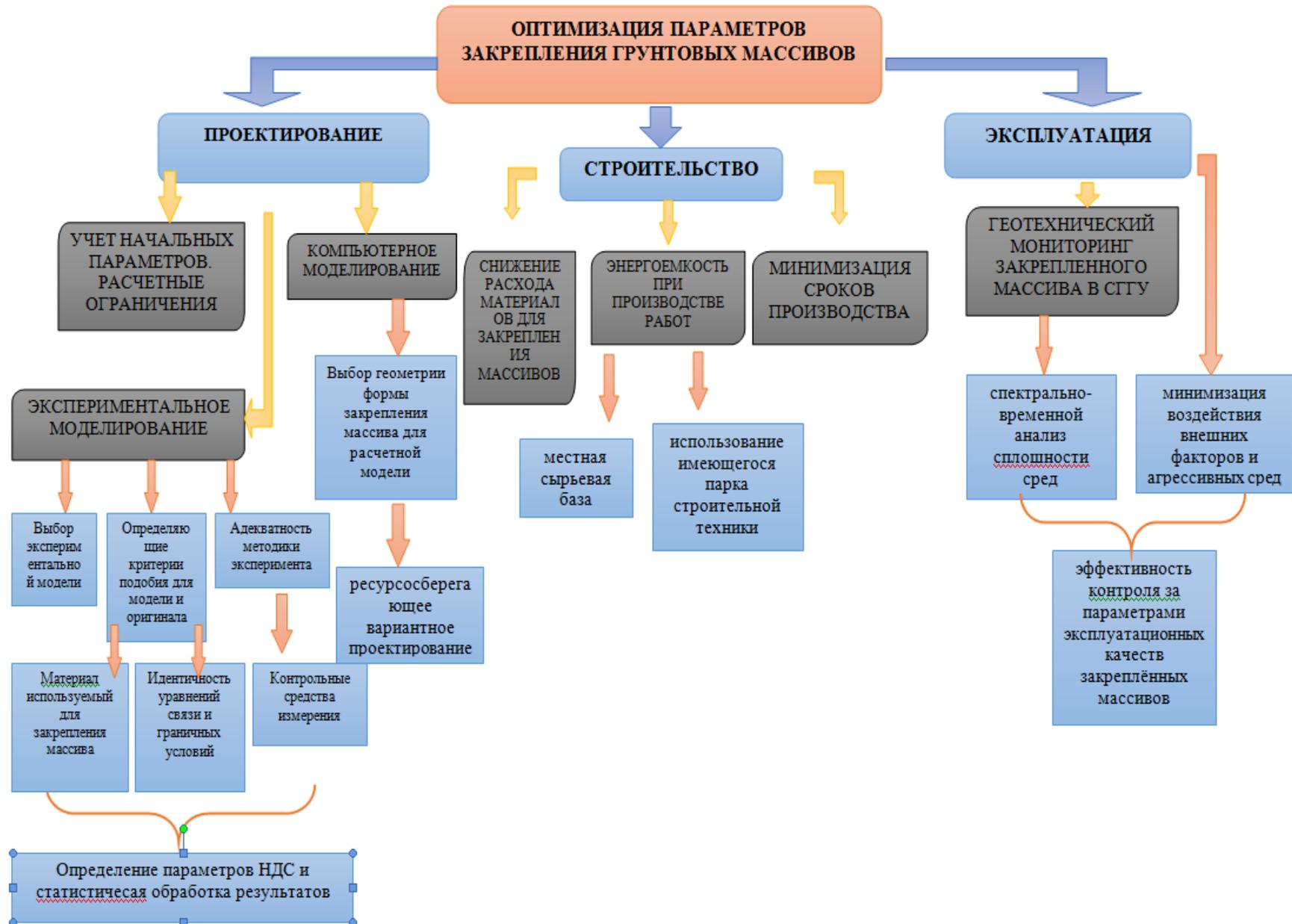
в реальных не благоприятных инженерно-геологических условиях производства грунтоцемента. На основании численных исследований определены особенности взаимодействия прилегающего к ограждению грунтоцементного массива и окружающего грунта при откопке котлована, в результате чего, предложена методика вычисления оптимальных размеров ГЦМ по оптимальному распределению коэффициента жесткости основания [13].

Результаты исследования были внедрены на стадии предпроектной проработки конструктивной и технологической схемы устройства подземного пространства многофункционального комплекса на площади Тверская Застава в г. Москве. Для заказчика выполнены рекомендации, в которых с учетом оптимизированных размеров области закрепления грунта струйной геотехнологией, подтверждалась возможность существенного ускорения производства строительных работ, позволяющая производить откопку котлована без каких-либо дополнительных защитных мероприятий для зданий окружающей застройки [13-15].

Оптимизация закрепления грунтовых массивов под нижним концом конструкций свай в фундаментах и вокруг глубоких котлованов с

алгоритмами определения правильности геометрической формы (объёма) закрепляемого массива, количества твердеющего состава в сухом состоянии, содержащегося в 1 м^3 укрепленного грунта, шаг свай в группе и методика вычисления размеров грунтоцементного массива по полученному оптимальному решению являются эффективным технологическим и конструктивным решением сложных геотехнических задач, направленных на устранение недопустимых осадок и деформаций фундаментов и подземной части сооружений, эксплуатируемых в сложных инженерно-геологических условиях.

Глубокий анализ практического опыта, совокупность решения группы многоплановых экспериментальных и аналитических задач, а также численного моделирования с разработкой алгоритмов определения основных прочностно-деформативных характеристик закрепления грунтовых массивов под нижним концом конструкций свай в фундаментах глубокого заложения и вокруг глубоких котлованов позволяет представить в виде схемы решение основных задач по определению оптимальных параметров на стадиях проектирования, строительства и эксплуатации (см. рис. 10).



Список литературы

1. Купчикова Н. В., Максимов А.О., Зинченко Д. В. Эволюция технологии устройства буронабивных свайных фундаментов с уширениями // Инновационное развитие регионов: потенциал науки и современного образования. Материалы национальной научно-практической конференции. Астрахань 2018. С.113-121.
2. Купчикова Н. В. Особенности берегоукрепления набережной реки Волги свайными оболочками, каменной наброской и строительства на намывных грунтах вдоль береговой зоны. Промышленное и гражданское строительство. 2014. № 6. С. 36-39.
3. Kupchikova N.V., Kurbatskiy E.N. Analytical method used to calculate pile foundations with the widening up on a horizontal static impact. В сборнике: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering Сер. "International Conference on Construction, Architecture and Technosphere Safety, ICCATS 2017" 2017. С. 012102.
4. Бройд И. И. Струйная геотехнология. Учебное пособие, Издательства АСВ, 2004г.
5. Купчикова Н.В. Экспериментальные исследования группы свай с поверхностными уширениями в виде ступеней // Строительство и реконструкция. - 2018. - № 1 (75). - С. 45-54.
6. Купчикова Н. В. Учет сдвиговых деформаций свайных фундаментов с усиливающими элементами // Строительная механика и расчет сооружений. - 2014. - № 3 (254). - С. 17-22.
7. Купчикова Н.В. Экспериментальные исследования по закреплению слабых грунтов под фундаментами физико-химическими методами с применением добавок-пластификаторов [Текст] / Н.В. Купчикова // Вестник гражданских инженеров. - 2014. - № 3 (44). - С. 123-132.
8. Купчикова Н.В. Учет сдвиговых деформаций свайных фундаментов с усиливающими элементами // Строительная механика и расчет сооружений. - 2014. - № 3 (254). - С. 17-22.
9. Купчикова Н.В. Системный подход в концепции формообразования свайных фундаментов с уширениями. Вестник МГСУ. 2017. Т. 12. № 12 (111). С. 1361-1368.
10. Ануфриев Д.П., Алешкин В.А., Боронина Л.В. и др. Качество жизни населения: оценка состояния и пути улучшения. Астраханский инженерно-строительный университет Астраханский государственный медицинский университет. Волгоград, 2015.
11. Купчикова Н.В. Экодевелопмент - строительство, проектирование и эксплуатация зданий и сооружений по новым стандартам Перспективы развития строительного комплекса. 2014. Т. -. С. 364-367.
12. Купчикова, Н. В. Влияние уплотнения грунта со щебнем на жесткость основания / Н. В. Купчикова // Журнал «Промышленное и гражданское строительство» №10 / -Москва, 2007 г.
13. Готман Ю.А. Определение оптимальных размеров грунтоцементного массива, снижающего перемещения ограждений глубоких котлованов. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Моск. гос. ун-т путей сообщ. (МИИТ) МПС РФ. Москва, 2011.
14. Черняков А.В., Готман Ю.А. Расчетная прочность грунтоцементных свай. Наука и техника в дорожной отрасли. 2011. № 4 (59). С. 16-17.
15. Ильичев В.А., Никифорова Н.С., Готман Ю.А., Трофимов Е.Ю. Анкеры с дополнительной цементацией как активный метод защиты зданий и коммуникаций в зоне влияния глубоких котлованов. Жилищное строительство. 2014. № 6. С. 35-38.
16. Коновалов, П. А. Основания и фундаменты реконструируемых зданий [Текст]: учебник / П. А. Коновалов. - 4-е изд. - Москва: ВНИИСТПИ, 2000. - 320 с.
17. Костерин, Э. В. Основания и фундаменты: учебник. - 3-е изд. - Москва: Высшая школа, 1990. - 431 с.
18. Силкин, А. М. Основания и фундаменты. - 2-е изд. - Москва: ВО «Агропромиздат», 1987. - 285 с.
19. Vesic, A.S. Expansion of cavities in infinite soil mass. Journal of the soil mechanics and foundations division: Proceedings of the American Society of civil engineers. Vol.98, 1972.-p. 265-290.
20. Hirayama, H: A. Unified base bearing capacity formula for piles // Soils and Foundations. vol. 26. - 1988. — No 3. Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering. - pp. 91 -102
21. Broid, I. I. For calculation of soil erosion by liquid jet in air stream process towards Jet Grouting Method // Proceedings of International Conference on Anchoring & Grouting towards the New Century, October 6-9 1999, Guangzhou, China.
22. Крутов В. И. Предложения по классификации оснований и фундаментов [Текст] / В. И. Крутов // Основания и фундаменты, механика грунтов, №1. - М.: 2013. - С. 23-27.
23. Штоль, Т.М. Технология возведения подземной части зданий и сооружений: учеб. пособие для вузов: Спец.: «Пром. и гражд. стр-во». М.: Стройиздат, 1990. - 288с.
24. Хазин, В. И. Опыт применения коротких пирамидальных свай / Т. М. Хазин. - М.: Оргтрансстрой, 1970. - 12с.
25. Головачев, А. С. Вибродинамические испытания призматических и пирамидальных свай в различных грунтовых условиях - труды ЦНИИСа, вып.85. - М.: Транспорт, 1972. - 106 с.
26. Смиренский, Г. М. Свайные фундаменты гражданских зданий. - М.: Стройиздат, 1970. - 141с.

© Купчикова Н. В., Готман Ю. А.

Ссылка для цитирования:

Купчикова Н. В., Готман Ю. А. Эффективность закрепления грунтовых массивов под нижним концом свайных фундаментов и вокруг глубоких котлованов // Инженерно-строительный вестник Прикаспия : научно-технический журнал / Астраханский государственный архитектурно-строительный университет. Астрахань : ГАОУ АО ВО «АГАСУ», 2019. № 1 (27). С. 13–26.