

КОНСПЕКТ ЛЕКЦИЙ ПО ДИСЦИПЛИНЕ «МЕТОДЫ УСИЛЕНИЯ ГРУНТОВ ОСНОВАНИЙ»

1. ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ И ФИЛЬТРАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА ГРУНТОВ. КЛАССИФИКАЦИЯ МЕТОДОВ УСИЛЕНИЯ ГРУНТОВ

- 1.1. Физико-механические свойства грунтов
- 1.2. Показатели обводненности грунтов
- 1.3. Сложные инженерно-геологические условия
- 1.4. Классификация методов усиления грунтов основания. Общие требования к проекту усиления грунтов.

В сложных инженерно-геологических условиях строителями формируются искусственные основания фундаментов, т.е. осуществляется усиление и водоизоляция грунтов. Сложные инженерно-геологические условия характеризуются признаками: неустойчивость, обводненность и специфичность грунтов. Эти признаки определяются по физико-механическим, деформационно-прочностным и фильтрационным свойствам грунтов.

Учитывая, что грунтовая структура преимущественно пористая или зерновая в грунтах сформированы межчастичные связи – водноколлоидные, жесткокристаллические или искусственные.

В соответствии с инженерно-геологической классификацией грунты подразделяются на твердые, дисперсные, мерзлые, искусственные.

Важнейшим свойством грунтов является его обводненность, которая характеризуется коэффициентом фильтрации и степенью обводненности, а также дебитом водоносного горизонта.

Весьма важно установить развитие в грунтах опасных геологических процессов. Эти процессы и свойства грунтов будут определять их специфичность – просадочность, набухание, засоление, высокая заторфованность, структурная нарушенность и т.д.

Поэтому основные **задачи** усиления грунтов оснований:

- формирование новой структуры грунта;
- формирования новых межчастичных связей;
- обеспечение необратимости сформированной структуры.

В связи с этим **цель** усиления грунтов основания это упрочнение и гидроизоляция грунта в соответствии со строительными требованиями.

Сложные инженерно-геологические условия характеризуются широким спектром свойств грунтов. С другой стороны, современное строительство выдвигает новые требования к основаниям. Поэтому на протяжении многих лет многочисленные НИИ, ВУЗы, проектные и специализированные предприятия разрабатывали методы усиления и водоизоляции грунтов оснований для решения возникающих проблем строительства.

Сегодня известно около ста методов укрепления и водоизоляции грунтов, применяемых в различных видах строительства. Например, только метод цементации грунтов имеет более десяти разновидностей. При этом каждый метод имеет строгую область применения по грунтовым условиям. В этой связи разработаны классификации этих методов по различным признакам (вид воздействия на грунт, коэффициент фильтрации грунта, инъекционный раствор и др.). По области применения специальных методов строительства всегда необходимо применять классификацию профессора Ржаницина Б.А. На рисунке 1 приведена наиболее распространенная классификация методов усиления грунтов, где по способу воздействия на грунт они разделены на конструктивные, физико-механические, физико-химические.

Основания и фундаменты повышенной несущей способности должны проектироваться на основании:

- инженерно-технологических и гидрогеологических изысканий площадки и данных лабораторных исследований грунтов;
 - результатов лабораторных и опытно-производственных работ по химическому закреплению либо армированию грунтов;
 - технической документации, отражающей конструктивные особенности зданий и сооружений, их назначение и условий эксплуатации;
- натурных обследований и данных наблюдений за осадками зданий и сооружений;

- данных о наличии реагентов, материалов, оборудования и технической возможности выполнения работ;
- действующих нормативных документов (СНиП 2.02.01, 2.02.03, 3.02.01, СП 50-101, 50-102, 22. 13330 и др.)

Проект укрепления грунтов основания фундаментов должен содержать:

- данные о нагрузках и воздействиях на грунты основания;
- пояснительную записку с описанием принятого способа закрепления, параметров крепящих растворов, конструктивной схемы усиления грунтов основания и опытных работ;
- параметры закрепления, определенные по данным лабораторных либо полевых исследований;
- графическую часть, включающую план расположения зон закрепления или армоэлементов, мест бурения скважин и погружения инъекторов с нанесением направленных гидроразрывов; геологические разрезы с указанием положения инъекторов по глубине и радиусов закрепления; количество заходов и их размеры; места выполнения контрольных инъекций; примечания, отражающие особенности проекта;
- результаты расчета основания из армированного или закрепленного грунта по предельным состояниям, согласно СНиП 2.02.01 и СП 50-101 для системы «сооружение-фундамент-основание», с учетом свойств закрепленных и незакрепленных массивов;
- подсчет объемов работ и расхода материалов;

- описание производства работ, контроля качества и техники безопасности;
- сметную документацию;
- данные общего характера по вспомогательным работам и мероприятиям, обеспечивающим производство работ в зимнее время.

В силу узкоспециализированного характера технологии закрепления грунтов проектирование, проект производства работ, контроль качества и приемка могут совмещаться в едином проекте укрепления грунтов.

При разработке проектов применяются различные конструктивные схемы закрепления и армирования грунтов в основании зданий и сооружений в зависимости от типа их фундаментов, грунтовых условий, способа закрепления и решаемых задач.

Основание повышенной несущей способности должно быть запроектировано с условием исключения недопустимых неравномерных осадок сооружения при замачивании грунта в пределах деформируемой зоны или просадочной толщи.

Выбор способа и конструктивной схемы закрепления или армирования должен производиться на основании технико-экономического сравнения возможных вариантов проектных решений, обеспечивающих наиболее полное использование прочностных и деформационных характеристик грунтов, с учетом наличия необходимого оборудования, материалов и местного опыта строительства. Состав контролируемых показателей, предельные отклонения, объем и методы контроля качества должны соответствовать обязательным требованиям СНиП 3.02.01, СП 50-101, 50-102, 22.13330 и другим по улучшению строительных свойств грунтов основания зданий и сооружений способами инъекции химических растворов, армирования вспененными цементогрунтовыми растворами через инъекционные трубки, устанавливаемые в теле фундамента, армирования сваями-инъекторами и буронабивными элементами.



Рис.1. Классификация методов усиления грунтов.

2. КОНСТРУКТИВНЫЕ МЕТОДЫ УСИЛЕНИЯ ГРУНТОВ ОСНОВАНИЯ

2.1. Грунтовые подушки

2.2. Шпунтовые ограждения

2.3. Армирование грунтов сваями

2.4. Анкерные системы

2.5. Подпорные стены

2.6. Стена в грунте

К конструктивным методам упрочнения грунтов относятся: грунтовые подушки, шпунтовые ограждения, армоконструкции, анкерные системы, подпорные стены, стена в грунте.

Грунтовые подушки формируются путем замены слабоустойчивого слоя грунта на несущей устойчивый грунт. Материал для подушек: песок, гравий, щебень. Подушки устраиваются на глубину 1.5 – 5 м.

Шпунтовые ограждения бывают деревянные, металлические, железобетонные и пластиковые. Они предназначены для ограждения котлованов или наклонных поверхностей. Преимущественно применяются металлические шпунты Ларсена.

Армирование грунтов предусматривает установку в них арматуры, буронабивных свай, буроинъекционных свай, грунтоцементных колон. Поскольку конструктивно армоэлементы имеют цилиндрическую форму, то они располагаются по следующим схемам: линейно, порядно, шахматно или комбинированно. К основным конструктивным параметрам относятся диаметр и глубина установки. В верхней части армоконструкций устраивается ростверк или железобетонная плита.

В качестве укрепляющих растворов в армоконструкциях используются бетон, цементный раствор, цементносиликатный раствор или глиноцементный раствор. Радиусы распространения инъектируемых растворов составляют 0.5-2 метра. Прочность закрепленного грунта достигает 40 – 80 МПа.

Стена в грунте (подпорная или противодиффузионная) формируется за счет прорезания грунта на заданную глубину и заполнения щели цементным раствором. Также стена в грунте может быть сформирована из буронабивных или грунтоцементных свай.

Анкерные системы грунта обеспечивают устойчивость откоса или подпорной стенки за счет закрепления замка анкера в коренных породах. Существуют конструкции анкеров: скважинные, инъекционные, механические.

Подпорной стеной называется строительная конструкция противодействующая боковому давлению грунта на склонах рельефа. Подпорные стены бывают: отдельно стоящие, гидротехнические, монолитные, сборные, массивные, тонкие.

По материалу стены бывают: железобетонные, кирпичные, деревянные, металлические, габионные.

По высоте подразделяются: низкие (до 10м), средние (до 20 м), высокие (свыше 20м).

В настоящее время получили широкое распространение комбинированные подпорные стены предназначенные для удерживания грунта и противофильтрационного экрана.

3.ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ УСИЛЕНИЯ ГРУНТОВ

3.1. Поверхностное уплотнение

3.2. Глубинное уплотнение

3.3. Замораживание грунтов

3.4. Водопонижение в грунтах

3.5. Противофильтрационные завесы

Уплотнение грунтов подразделяется на поверхностное и глубинное. Поверхностное уплотнение осуществляется катками или трамбовками диаметром 1.4-3.5 м. и массой 2 – 50т. Трамбовки сбрасываются с высоты 4-8 м. При этом уплотняется толща грунта 1.5-6 м. Уплотнение грунтов наиболее эффективно при оптимальной влажности (на границе раскатывания) и при степени обводненности не более 0.7.

Глубина уплотнения зависит от диаметра трамбовки и коэффициента уплотнения грунта: песок – 1.55; глина – 1.5; лёсс – 1.2 – 1.3. Полоса трамбовки составляет 90% от диаметра трамбовки.

После трамбовки грунты приобретают свойства:

- сцепление – 0.075-0.1 МПа;
- угол внутреннего трения – 28-30 град;
- модуль деформации – 20-30 МПа;
- расчетное сопротивление основания из уплотненных грунтов при плотности сухого грунта 1.7 г/см^3 – 0.25-0.4МПа.

Глубинное уплотнение преимущественно предусматривает вытрамбовывание котлованов для столбчатых и ленточных фундаментов в просадочных грунтах I и II типа. Масса трамбовки назначается, чтобы давление по основанию трамбовки было не менее 30-50кПа. Размеры трамбовки зависят от размера фундамента понижу – 0.3-1.6м.

Результатом вытрамбовки котлованов является котлован и зона уплотненного грунта. Котлованы бывают мелкого заложения и глубокого заложения, если под трамбовку добавляется щебень. При этом несущая способность грунта увеличивается в 1.5-3 раза. Для получения заданной глубины трамбования грунта рассчитывается число ударов трамбовки. Оно зависит от средней величины понижения грунта за один удар (6-15см).

Минимальное расстояние между котлованами зависит от размеров трамбовки и составляет 0.5-3 ее диаметра.

Универсальным способом упрочнения грунта является замораживание, которое бывает рассольное и низкотемпературное.

В грунт устанавливается замораживающая колонка в которую подается хладагент (хлористый кальций при температуре – 25⁰С). В результате вокруг колонки образуется замороженный грунт – ледопородный цилиндр (ЛПЦ) с радиусом 0.5-1.2м. Прочность замороженного грунта составляет 80-100 МПа. Различными комбинациями расположения ЛПЦ возможно сформировать вокруг котлована ледопородное ограждение (ЛПО). Время замораживания грунта зависит от его свойств и составляет 6-15 суток.

Низкотемпературное замораживание основано на применении в качестве хладагента жидкого азота.

Водопонижение применяется только в песках путем установки системы иглофильтров с последующей откачкой воды. В результате происходит понижение уровня грунтовых вод на заданную глубину, что позволяет установить фундаменты в «сухом котловане».

Противофильтрационные завесы предусматривают формирование в грунтах водонепроницаемого экрана. Для этого применяются различные инъекционные растворы – цементные, глиноцементные, глинистые, полимерные, силикатные, цементносиликатные, шлакоцементные и др. Технологическая схема формирования противофильтрационных завес включает в себя: бурение системы скважин (по необходимой схеме). установку инъекционного оборудования в скважине и на поверхности (пакер, кондуктор, оголовки, шланги, насосы, краны и др.) приготовление и нагнетание тампонажного раствора при заданных режимных параметрах (расход раствора, давление, время). Контроль качества постановки противофильтрационных завес выполняется гидродинамическими методами.

4.ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ УСИЛЕНИЯ ГРУНТОВ ОСНОВАНИЯ

- 4.1. Цементные растворы. Инъекционная цементация грунтов.
- 4.2. Методика проектирования цементации грунтов
- 4.3. Химизация грунтов полимерными смолами
- 4.4. Проектирование химизации грунтов
- 4.5. Силикатизация грунтов
- 4.6. Методика проектирования силикатизации
- 4.7. Электрохимическая обработка грунтов
- 4.8. Проектирование электрохимической обработки грунтов
- 4.9. Специфические методы закрепления и тампонажа грунтов
 - Глинизация песчаных, трещиноватых и кавернозных грунтов
 - Битумизация грунтов
 - Глиноцементный тампонаж грунтов
 - Применение ресурсосберегающих смесей при усилении грунтов

Упрочнение грунтов оснований может быть применено для увеличения несущей способности оснований реконструируемых зданий. Способы закрепления грунтов основаны на нагнетании раствора, состоящего из одного или нескольких компонентов, способных твердеть или при смешивании образовывать гель в порах грунта, сообщая ему прочность и водонепроницаемость]. При цементации используются суспензии с различными добавками. При выборе способа закрепления следует руководствоваться данными таблицы 1.

Выбор способа закрепления производится на основе анализа инженерно-геологических условий и технико-экономического анализа с учетом конструктивных особенностей строящегося или реконструируемого здания.

Таблица 1. — Выбор способа закрепления грунтов основания

Способы закрепления	Вид грунта	Коэффициент фильтрации, м/сут
Цементация	Крупнообломочный и песчаный	1–100
Силикатизация: двухрастворная однорастворная газовая однорастворная	То же То же Крупноблочный и песчаный Просадочный	2–80 0,5–5 5–50 Не менее 0,1 Не менее 0,2
Электросиликатизация	Глинистый и песчаный	0,1–0,005
Термическое закрепление	Просадочный суглинок и глина	При любом коэффициенте фильтрации

Цементацию грунтов применяют для упрочнения нагнетанием цементного раствора оснований, сложенных песками средней крупности, крупными и гравелистыми, а также гравийным и галечниковым грунтом. Грунт, заинъектированный цементным или цементно-глинистым раствором, в пределах его распространения становится скальным. Несущая способность его резко возрастает, пустоты в основании ликвидируются, а вместе с ними предотвращается возможность проявления недопустимых осадок здания или сооружения. В качестве инъекционного раствора используются: цементный с

водоцементным отношением (В/Ц) 20–0,4; цементно-песчаный с В/Ц 0,5–4, цементно-глинистый, цементно-песчано-глинистый растворы.

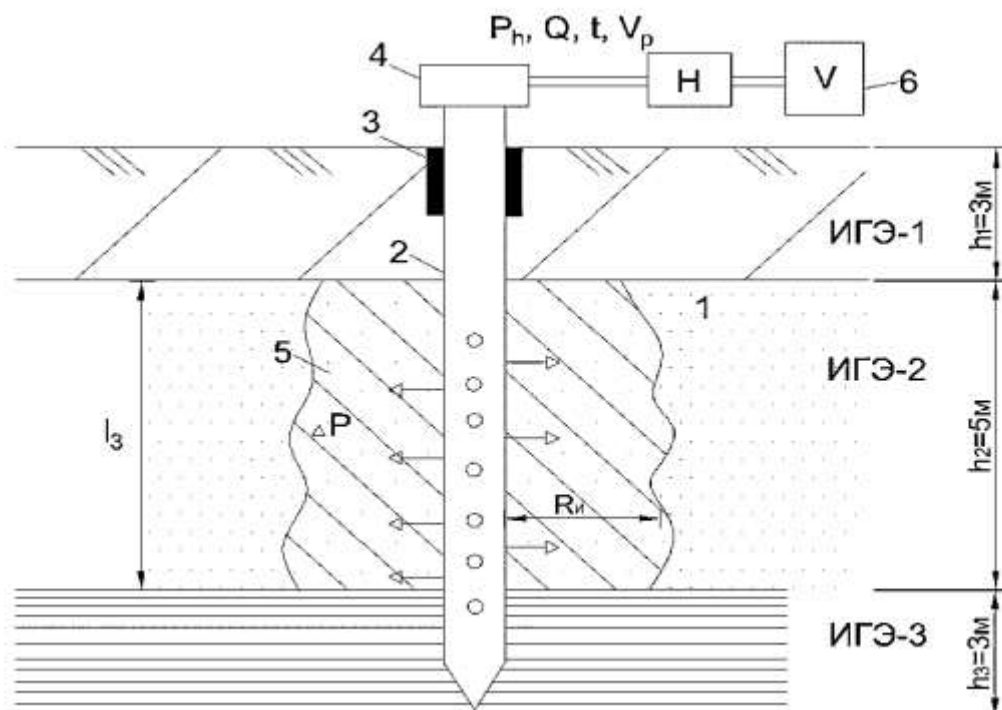


Рис.2. Схема инъеции цементного раствора в обводненный грунт: 1 – песок; 2 – иньектор; 3 – пакер; 4 – наголовник; 5 – зона закрепления; 6 – иньекционный комплекс.

Для приготовления растворов лучше всего использовать обыкновенный портландцемент, обеспечивающий наибольшую плотность цементного камня марки более 300. Раствор нагнетают через иньекторы из стальных труб диаметром 50–150 мм. Длина перфорированной части составляет 1–0,8 м. Иньекторы, погружаемые в подлежащие закреплению грунты оснований, размещают в соответствии с проектом производства работ в линейном, порядном или шахматном порядке. Давление при нагнетании 0,3–1,0 МПа. Уточнение его производится в результате опытного нагнетания в натурных условиях. Радиусы закрепления грунта, м, принимаются следующие:

трещиноватые скальные породы.....	1,2–2,0;
галечниковые грунты.....	0,75–1,0 ;
крупные пески	0,70–0,75;
пески средней крупности.....	0,30–0,50;
супеси	0,3 – 0,5.

Нагнетание раствора в грунт продолжается до появления так называемого «отказа» в поглощении раствора, под которым понимается снижение расхода инъецируемого раствора до 5–10 л/мин при избыточном давлении раствора у

устья скважины (при 0,1–0,5 МПа). На 1 м³ укрепленного объема грунта расходуется 0,15–0,4 м³ раствора. Нормальный процесс цементации продолжается от 40 мин. до нескольких часов.

Химизация грунтов осуществляется инъектированием полимерных смол с отвердителями. Например, наиболее широко применяются карбомидные, фенолформальдегидные и полиуретановые смолы. Прочность закрепления грунтов достигает 40 МПа.

Силикатизация основана на применении силикатных растворов и их производных, которые при соединении с коагулянтом образуют гель кремниевой кислоты, цементирующей частицы грунта, главным образом просадочного. При двухрастворном способе через инъекторы из стальных труб диаметром 19–38 мм, забитые на заданную глубину, закачивают поочередно растворы силиката натрия и коагулянт – хлористый кальций. Образующийся в результате смешения гель кремниевой кислоты придает грунту прочность при сжатии 1,5–5 МПа и водонепроницаемость

При однорастворном способе силикатизации в грунт закачивают один гелеобразующий раствор, приготовленный из смеси силиката натрия с коагулянтом — ортофосфорной кислотой или алюминатом натрия. Образование геля в грунте при смешении этих растворов происходит в заданное время, зависящее от количества коагулянта. Закрепленный однорастворной силикатизацией грунт имеет прочность на сжатие 2–5 МПа.

Проектирование укрепления грунтов методом однорастворной силикатизации ведут в такой последовательности. Принимают радиус закрепления грунта r от одного инъектора, продолжительность нагнетания раствора и режим давления при нагнетании. Иногда радиус закрепления подбирают конструктивно в зависимости от ширины фундамента или опытным путем. Вначале определяют расстояние между инъекторами в одном ряду $l_{\text{н}}$ и между рядами $l_{\text{р}}$: $l_{\text{н}} : l_{\text{р}} = 1,73r$. Затем вычисляют глубину заходки $l_3 = 1,5r$ и число заходов $n = z/l_3$ (где z – глубина просадочной толщи ниже подошвы 0,5 фундамента, м).

Газовая силикатизация просадочного грунта представляет собой нагнетание в грунт двуокиси углерода для предварительной его активизации с последующей закачкой силикатного раствора. После нагнетания силикатного раствора в грунт снова закачивают двуокись углерода. Способ газовой силикатизации позволяет закреплять лессовые грунты в более широком диапазоне степени их влажности.

Электрохимическое закрепление может быть использовано для повышения несущей способности и уменьшения деформируемости водонасыщенных глинистых, пылеватых и илистых грунтов с коэффициентом

фильтрации $k_f = 10^{-2} \dots 10^{-8}$ м/сут. Оно основано на сочетании воздействия постоянного электрического тока на грунты и вводимых в него химических добавок. От того, какого рода добавки используются в этом процессе, зависит вид закрепления. Так, электросиликатизация грунтов основана на сочетании закрепления грунтов способом силикатизации и обработки их постоянным электрическим током. Электрический ток ускоряет и облегчает проникание химических растворов в грунт. Условием применения способа является наличие водонасыщенных грунтов. Инъекторы-электроды погружают в грунт основания с двух сторон фундамента через 0,6–0,8 м. Закрепление ослабленного грунта ведут вдоль фундамента заходками снизу вверх. При этом для уменьшения объема незакрепленной зоны инъекторы целесообразно погружать в грунт под углом 10–15° (рис. 3.). Для электросиликатизации пользуются растворами жидкого стекла и хлористого кальция. Общий расход электроэнергии на закрепление 1 м³ грунта составляет 10–15 кВтч.

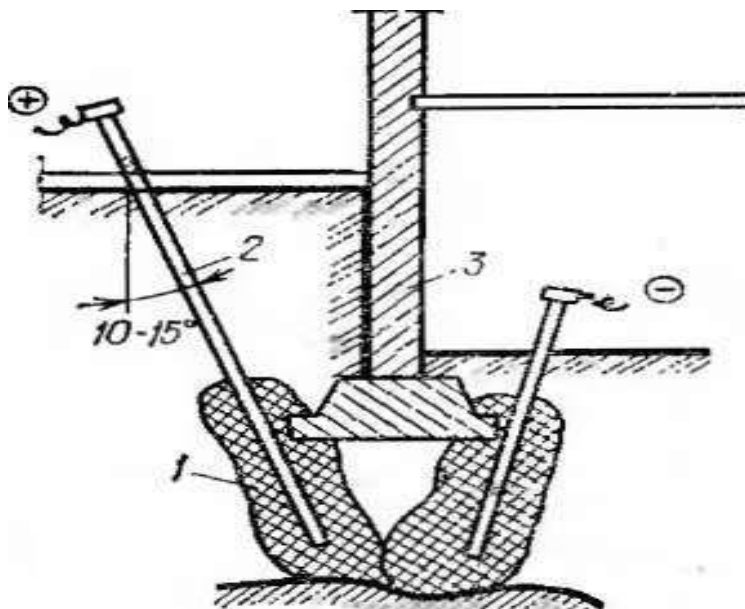


Рисунок 3. – Закрепление грунтов основания электросиликатизацией
 1 – закрепленный массив грунта (заходками сверху вниз);
 2 – инъектор; 3 – существующий фундамент

Несколько иначе проходит электролитическая обработка грунта. Для этого по обе стороны фундамента здания через 0,6–2,4 м забивают трубчатые электроды, соединенные с источником тока в 100–120 В. В инъекторы-аноды подают растворы CaCl_2 потом $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ или $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$, а из инъекторов катодов откачивают поступившую в них воду. Электрохимические процессы ведут к значительному изменению химикоминералогического и гранулометрического составов грунта упрочнению его. Установлено, что упрочнение грунта продолжается и после прекращения его электрохимической обработки. Расход

электроэнергии составляет 60–100 кВтч/м³, а стоимость 1 м³ укрепленного грунта примерно в 3 раза меньше, чем применение электросиликатизации.

Электроосмотическое уплотнение ведется без введения в грунт химических добавок. В электрическом поле связанная с грунтом вода переходит в свободную, и от стержней-анодов стремится к иглофильтрам-катодам, откуда и откачивается. Вследствие этого происходит обезвоживание и уплотнение грунта

Термическое закрепление основано на нагнетании в грунтовой массив теплового потока, который, проникая в поры, обжигает грунт, увеличивает его прочность и ликвидирует просадочные и пучинистые свойства.

Литература

1. Инженерная геология: Учебник/ В.П.Ананьев, А.Д. Потапов –М.:Высшая школа. 2005. 575с.
2. Специальная инженерная геология: Учебник/ В.П.Ананьев, А.Д. Потапов – М.: ООО "Научно- издательский центр ИНФРА-М", 2017. 356с.
3. Прокопов А.Ю., Акопян В.Ф., Ткачева К.Э. Изыскания в сложных инженерно-геологических условиях: Уч. пособ. – Ростов-на-Дону: РГСУ.2015. 85с.
4. Гончарова Л.В. Основы искусственного улучшения грунтов. –М.: Изд. МГУ,1973. 376с.
5. Исследования параметров химического и электрохимического закрепления грунтов/ П.Н. Должиков, А.А. Шубин, С.Г. Страданченко – Новочеркасск: ЮРГТУ. 2009.198с.
6. Коновалов П.А. Основания и фундаменты реконструируемых зданий. – 4-е изд. – М.: Бумажная галерея. 2000.318с.
7. Физико-химическое укрепление пород при сооружении выработок/ В.А. Хямяляйнен, В.И. Митраков, П.С. Сыркин – М.: Недра.1996. 352с.
8. Тампонаж обводненных горных пород. Справочное пособие/ Э.Я. Кипко и др. – М.: Недра. 1989. 318с.
9. Должиков П.Н., Збицкая В.В. Буро-инъекционная технология упрочнения оснований фундаментов. – Ростов-на-Дону: ООО «ДГТУ-принт».2019.174с.
10. Антонов В.М., Леднев В.В., Скрылев В.Н. Проектирование зданий при особых условиях строительства и эксплуатации. Уч. пособ. – Тамбов: ТГТУ. 2002. 240 с.