

# ОБЩАЯ И РЕГИОНАЛЬНАЯ ГЕОЛОГИЯ. ПРОБЛЕМЫ ИНЖЕНЕРНОЙ ГЕОЛОГИИ, ГИДРОГЕОЛОГИИ, ГЕОФИЗИКИ

---

Т.Т. АБРАМОВА

## ГЕОТЕХНИЧЕСКИЕ ВОЗМОЖНОСТИ СОВРЕМЕННЫХ СПОСОБОВ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ СЛАБЫХ ГРУНТОВ

*Московский государственный университет им. М.В.Ломоносова,  
г. Москва, Российская Федерация,  
attoma@mail.ru*

В последнее время часто приходится строить в районах распространения просадочных или набухающих грунтов, на оползневых участках, пльвунах, на болотистых заторфованных отложениях и других разновидностях неустойчивых и слабых грунтов. Для существующих и проектируемых сооружений большое значение имеют проблемы, связанные с динамическими воздействиями на массивы грунта. Этому способствует, прежде всего, резкое увеличение на них техногенных нагрузок. Так как вибрационное поле оказывает влияние на грунтовый массив и конструкции зданий и сооружений, актуальной и практически важной геотехнической задачей является целенаправленное управление реакцией грунтов, прежде всего дисперсных, на динамическое воздействие. Одним из возможных направлений такого управления может быть искусственное изменение жесткости грунтов и характеристик затухания в них волн напряжений с помощью различных методов технической мелиорации.

Одним из наиболее важных свойств грунтов, определяющих их вибростойкость, является влажность. Режим влажности, создающийся при строительстве и поддерживаемый в течение эксплуатации сооружения, обуславливает в дальнейшем прочность и устойчивость грунтов, испытывающих действие динамических нагрузок. Поэтому намечая контуры концепции управления состоянием и свойствами грунтов, необходимо, прежде всего, учитывать практически повсеместную неизбежность их обводнения либо изначально, либо вследствие послепостроечного замачивания или подъема уровня грунтовых вод. В настоящее время в практике инъекционных работ используется несколько схем нагнетания растворов. Выбор конкретной схемы определяется инженерно-геологическими условиями участка работ, глубиной инъекционных работ и назначениями инъекции.

Разработанные к настоящему времени системы глубинной обработки грунтов с использованием вяжущих материалов С.Д. Воронкевич [1] объединяет в две основные группы:

- I. Инъекционный процесс (инъекция с однородной пропиткой грунта; разрывная инъекция; уплотнительная инъекция; струйная технология).
- II. Метод глубинного перемешивания (ДММ) или буросмесительная технология.

I. Инъекционная пропитка грунтов осуществляется специально подобранными растворами, обладающими цементирующими возможностями. Такой характер распространения растворов предусматривает применение давлений инъекций ниже «критических», т.е. давлений, исключаяющих разрыв грунта. Именно для этого варианта внедрения раствора проведено разделение грунтов на группы, в пределах которых

эффективно применение тех или иных инъекционных рецептур. Например, для закрепления крупнозернистых песчаных разностей обычно используют цементные растворы. Для управления динамической неустойчивостью массивов лессовых грунтов, учитывая многообразие их состава и свойств, применяют различные модификации растворов на основе силиката натрия. Работы, проведенные М.Н. Ибрагимовым в г. Волгодонске и Средней Азии по закреплению просадочных лессовых грунтов в основаниях жилых зданий и промышленных сооружений, позволили значительно снизить их сейсмическую интенсивность [2]. Исследования, проведенные группой ученых (Н.Г. Мавляновой, В.А. Измаиловым, Н.А. Ларионовой) [3] по силикатизации лессовых грунтов Таджикистана, также подтвердили высокую эффективность данного способа.

При упрочнении широкого диапазона суглинистых и глинистых грунтов (гг. Уфа, Херсон, Душанбе и др.) наиболее эффективно и перспективно использовать высококонцентрированные растворы щелочи. Это наиболее полно отражено в исследованиях Ф.Е. Волкова [4]. По результатам статического зондирования, проведенного до и после защелачивания, отмечаются резкие пики, как лобового сопротивления, так и бокового трения [5].

Однако в век глобальных перемен метод инъекционной пропитки используется значительно реже, чем более современные, так как эффективность его использования определяется оптимальным сочетанием проницаемости грунта (и структуры порового пространства) с реологическими свойствами инъекционных растворов при правильном выборе режима инъекционного процесса.

Наибольшее распространение в практике инъекционных работ получила в последнее время схема манжетных колонн, разработанная фирмой Солетанж. Необходимо отметить, что нагнетание химических растворов в грунт производится с помощью насосов, которые должны отвечать следующим требованиям: иметь регулируемую подачу от 5 до 20 л/мин., обеспечивать давление до 1 МПа.

Разрывная инъекция грунтов проводится с частичным или полным разрушением грунта, путем использования нагнетания под большим давлением заведомо неинъектабельных растворов в виде густых суспензий и вязких коллоидных систем. Разрывная инъекция с помощью манжетной технологии (ММТ) наиболее часто использовалась в сложных инженерно-геологических условиях Санкт-Петербурга при строительстве метро «Спортивная», «Адмиралтейская», «Новочеркасская». На различных объектах Санкт-Петербурга проведение ММТ позволило получить максимальные величины модулей деформации. Например, водонасыщенный пылеватый песок приобретал значения модуля деформации в интервале от 16,7 до 25 МПа при начальном – 10 МПа. Величина динамического модуля в среднем составила 24 – 25 МПа, значение коэффициента Пуассона – 0,41 [6].

Использование высоконапорной инъекции (ВНИ) в отличие от разрывной манжетной технологии предусматривает предварительное оконтуривание упрочняемого массива, позволяющее ограничить распространение инъекционного раствора в необходимой области.

Широко известный в России метод, названный академиком В.И. Осиповым «Геокомпозит», основан на создании направленных локальных включений в виде линз (прослоек) в массиве грунта путем поинтервального нагнетания растворов строго заданных объемов по расчетной объемно-планировочной (композиционной) схеме. Его развитием и разработкой занимались В.И. Осипов, А.И. Нестеров, Б.Н. Мельников, С.Д. Филимонов и другие. В связи с тем, что процесс ВНИ трудно поддается контролю, особенностью технологии фирмы «Геомассив» является оконтуривание замкнутого объема массива грунта двумя экранами – вертикальным и горизонтальным, в пределах которого создается «геокомпозит» [7].

В основе струйной технологии лежит использование энергии струи жидкости для разрушения и перемешивания исходного природного грунта под давлением от 1 до 70 МПа. Она высокопроизводительно позволяет создавать грунтоцементные конструкции различных размеров и форм для всех типов грунтов. Анализ большого количества работ, проведенных А.Г. Малининым, П.А. Малининым, В.М. Улицким, А.В. Шахназаровым, А.Г. Шашкиным, С.Г. Боговым, И.М. Лебешевым, М.С. Засориным и др. на самых сложных объектах нашей страны, показал, что прочностные свойства материала грунтоцементных свай зависят от многочисленных факторов: гранулометрического состава грунта, водоцементного отношения раствора, количества цементного раствора на 1 п.м. свай. В работе [8] приведены прочностные характеристики широкого спектра закрепленных грунтов по данным зарубежных источников.

Данная технология была использована на многих объектах Санкт-Петербурга, Москвы, Перми, Казани и других городов. Яркими примерами использования струйной цементации, вошедшими в программу освоения подземного пространства Москвы, стали: укрепление грунтов при проходке Серебряноборского тоннеля, Алабяно-Балтийских тоннелей; строительство 3-го транспортного кольца и других объектов. Более подробно это освещено в работе [9].

Достаточно эффективную и производительную оценку качества грунтоцементных свай, закрепленных с помощью струйной цементации, удалось получить совместно ученым из ООО «НПО КОСМОС» и геологического факультета МГУ [10]. Применение скважинных сейсмоакустических наблюдений позволяет следить за качеством искусственного закрепления грунтов на основании кинематики и динамики распространения объемных волн и гидроволн вдоль оси скважины.

II. Увеличение несущей способности, снижение осадок и латеральных смещений грунта при динамических нагрузках, а также уменьшение воздействия вибрации от оборудования возможно и с помощью метода глубинного перемешивания – буросмесительного способа, основанного на размельчении в массиве, без выемки его на поверхность, специальным рабочим органом – буросмесителем (миксером) с одновременным введением вяжущих материалов и химических растворов. В качестве вяжущих чаще всего используются портландцемент и известь. Он также используется для улучшения динамических свойств грунта в сейсмически активных районах. В некоторых регионах этот метод применяется при укреплении оснований для морского и шельфового строительства. Виды глубинного смешивания выделяют по типу применяемого связующего и по методу смешивания (сухое, влажное и др.). Существует несколько базовых технологий смешивания: скандинавская, японская, массовая стабилизация и др.

При использовании скандинавского метода обычно дозировки вяжущих составляют: для извести – 5 – 15 %, для цемента – 10 – 25 %. При обработке органических грунтов количество добавок может возрасти до 40 %, а в случае торфяных грунтов даже до 100 %. Иногда используют смесь цемента и извести в соотношении 1:1 и 1:3. Это соотношение зависит от содержания органических веществ в грунте: чем больше органики в грунте, тем большее количество цемента требуется в смеси.

Сдвиговая прочность обработанных грунтов постепенно увеличивается во времени, благодаря развитию пуццолановых реакций, и этим объясняется желательная норма содержания глинистой фракции не менее 20 %. Причем, суммарное содержание глинистой и пылеватой фракций должно преимущественно превышать 35 %, что, как правило, соответствует значению числа пластичности более 10. Недостаток таких фракций в грунте может быть компенсирован добавками золы-уноса или цемента. Пуццолановые реакции протекают месяцы и годы, несмотря на то, что повышенная

температура и высокие значения  $pH$  среды ускоряют химические реакции в системе, повышая растворимость силикатов и алюмосиликатов.

Японская технология используется для улучшения слабых глинистых грунтов и илов до глубины 50 м. Разновидности способов обработки грунтов на основе этой технологии осуществляются за счет изменения набора и диаметров смесителей в рабочем органе и агрегатного состояния вводимого вяжущего (порошок, жидкий раствор, паста и т.п.) Применяя соответствующие модификации метода, можно получить обработанные массивы различной конфигурации в зависимости от назначения.

Метод сухого перемешивания (*Dry mixing*) используется в грунтах с достаточным содержанием влаги, чтобы обеспечить химическую реакцию сухого вяжущего с грунтом. Таким образом, этот метод позволяет уменьшить содержание воды в грунте. К основным преимуществам сухого перемешивания относится возможность стабилизации сильно обводненных слабых грунтов.

Метод мокрого смешивания (*Wet mixing*) наиболее часто используется в России. Во время бурения грунт размельчается и перемешивается с водоцементным раствором. Раствор цемента как вяжущее считается более универсальным и подходит для грунтов любого типа. Вместо него можно использовать известь, золу, шлак и др. С помощью этого метода на месте устанавливаются грунтоцементные колонны, которые могут быть в диаметре от 40 до 120 см. Максимальная длина колонн достигает 25 – 30 метров.

Укрепление слабых дисперсных грунтов (от песков до илов) цементным раствором с помощью бурсмесительной технологии обуславливается тем, что продукты гидратации и гидролиза цемента взаимодействуют с минеральной поверхностью частиц грунта, коагулируют, агрегируют наиболее дисперсную его часть и в процессе своего роста и кристаллизации образуют прочную коагуляционно-кристаллизационную структуру грунтоцемента. На кинетику гидратации цемента и процессы структурообразования грунтоцемента оказывают наибольшее влияние следующие факторы, зависящие от состава и свойств грунтов: гранулометрический состав, химико-минеральный состав, структурно-текстурные особенности,  $pH$  и др.

Прочность песчаных грунтов при их закреплении способом глубинного смешивания может колебаться в пределах 3 – 20 МПа в зависимости от их дисперсности. У органических глинистых грунтов с включением большого количества органики, с высокой влажностью и пределом текучести часто фиксируется крайне медленный рост прочности во времени. Для обработки органических грунтов с влажностью до 120 % эффективным оказалось воздействие гипса и негашеной извести. В присутствии гипса образуются игольчатые кристаллы этtringита, который обеспечивает высокую степень связности системы.

Оценку деформационных свойств известково-цементных колонн при статическом и динамическом нагружении представил К.Р. Массарш в своей работе [11]. Им были проведены исследования по искусственному преобразованию массива грунта слабой пластичной глины с органической известью по технологии сухого перемешивания. В ходе полевых исследований определялась скорость волны сдвига с использованием вертикальных скважин до закрепления грунта и после устройства известково-грунтовых колонн в различные промежутки времени. Скорость волны сдвига в слабой глине с органикой до ее укрепления составляла 40 м/с. За 41 день она увеличилась до 310 м/с и в дальнейшем до 360 м/с. Максимальная величина модуля сдвига для закрепленного грунта при сдвиговой деформации 0,001 % составила 255 МПа. Выявлено, что на модуль сдвига упрочненного грунта значительное влияние оказывает обжимающее напряжение, что согласуется и с данными других авторов.

Использование всех модификаций этого способа позволяет успешно обрабатывать практически все виды слабых и структурно-неустойчивых грунтов, в том числе слабоводопроницаемых, ниже уровня грунтовых вод, независимо от типа напластования и других микроструктурных особенностей, а также глинистые грунты текучей консистенции, рыхлые водонасыщенные пески, заторфованные грунты.

Применение буромесительной технологии наиболее эффективно в неблагоприятных инженерно-геологических условиях, так как позволяет избежать дорогостоящих вариантов устройства свайных фундаментов.

В заключение можно отметить, что среди критериев, способных в той или иной мере влиять на выбор метода технической мелиорации для определенных грунтовых условий, необходимо отметить следующие: пригодность выбранного метода для данного типа грунтовых условий и объекта; влияние на окружающую среду; безопасность производства работ; профессиональная классификация производителей работ; грамотное применение техники и технологии ведения работ.

### Список литературы

1 Воронкевич, С.Д. Основы технической мелиорации грунтов / С.Д. Воронкевич Учеб.; 2-е изд. – М. : Научный мир, 2005. – 504 с.

2 Ибрагимов, М.Н. Опыт закрепления лессовых грунтов силикатизацией / М.Н. Ибрагимов // Геотехнические проблемы строительства на просадочных грунтах в сейсмических районах: труды III-го Центрально-Азиатского международного геотехнического симпозиума. – Душанбе, 2005. – С. 336–340.

3 Мавлянова, Н.Г. Сравнительная оценка влияния методов замачивания и силикатизации лессовых грунтов на повышение их сейсмических свойств в региональных условиях Узбекистана. / Н.Г. Мавлянова, В.А. Исмаилов, Н.А. Ларионова // Инженерная геология. – 2017. – № 4. – С.72–81.

4 Волков, Ф.Е. Укрепление водонасыщенных глинистых грунтов растворами гидроксида натрия высоких концентраций / Ф.Е. Волков // Инженерная геология. – 2012. – №4. – С.51–59.

5 Коваленко, В.Г. Снижение геориска путем управления динамической устойчивостью массивов дисперсных грунтов / В.Г. Коваленко // ГеоРиск. – 2007. – Декабрь. – С. 12–17.

6 Компания «Геострой» [электронный ресурс] – Режим доступа : <http://www.geostroy.ru/>. – Дата доступа: 20.11.2014.

7 Осипов, В.И. Уплотнение и армирование слабых грунтов методом «Геокомпозит» / В.И. Осипов, С.Д. Филимонов // ОФМГ. – 2002. – №5 – С.15–21.

8 Малинин, А.Г. Применение грунтоцементных свай в городском строительстве / А.Г. Малинин // Пермские строительные ведомости. – 2001. – №4. – С. 22–27.

9 Абрамова, Т.Т. Современные методы управления свойствами грунтов на участках высоких динамических нагрузок / Т.Т. Абрамова, Е.А. Вознесенский // Геотехника. – 2015. – №4. – С. 6–25.

10 Нуждин, М.Л. Применение метода высоконапорного инъецирования при усилении основания аварийного здания // Труды Каспийской международной конференции по геоэкологии и геотехнике. Баку (Азербайджан), 2003. С.183–187.

11 Массарш, К.Р. Деформационные свойства стабилизированных грунтовых колонн / К.Р. Массарш // Развитие городов и геотехническое строительство. – 2006. – № 10. – С. 158–175.