

ИССЛЕДОВАНИЯ И ВЫБОР ОПТИМАЛЬНЫХ ВАРИАНТОВ МЕХАНИЗИРОВАННЫХ СПОСОБОВ УКРЕПЛЕНИЯ ЛЕССОВЫХ ГРУНТОВ ОСНОВАНИЙ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ В УСЛОВИЯХ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ

В.Н. Лютов, С.К. Куликов

Обосновывается необходимость поиска, выбора и модернизации вариантов технических и технологических решений использования серийных отечественных установок и оборудования для укрепления и стабилизации лессовых грунтов оснований зданий и сооружений механизированными способами в условиях Западной Сибири и Алтайского края. Приведен обзор и анализ механизированных способов укрепления лессовых грунтов в условиях Западной Сибири.

Ключевые слова: лессовые грунты, механизированные способы укрепления грунтов, выбор оптимальных технических и технологических вариантов решений.

ВВЕДЕНИЕ

Направление представляемой научно-исследовательской работы весьма актуально для условий г.Барнаула, Алтайского края, и, в целом, для Западной Сибири, поскольку проблема лёссов, возникающая более ста лет назад, все еще существует и далека до полного разрешения. По оценкам специалистов, до 45% стоимости работ по строительству гражданских и промышленных объектов на лёссовых грунтах тратится на комплекс мероприятий, предотвращающих деформацию сооружений из-за просадочности лёссовых грунтов [1, 4].

В Алтайском крае и Западной Сибири лессовые грунты занимают 25-30% территории. Опыт эксплуатации зданий и сооружений на лёссовых просадочных грунтах свидетельствует о том, что основной причиной деформации является неравномерная просадка основания, возникшая в результате замачивания (чаще всего источником замачивания являются водопровод, канализация и иногда поверхностные воды). Кроме того, немаловажное влияние оказывают и ошибки при проведении инженерно-геологических изысканий, а также несоблюдение технических условий при производстве строительно-монтажных работ, особенно в зимнее время [1, 2].

Примеры аварийных состояний зданий и сооружений в районах Барнаульского Приобья и Западной Сибири свидетельствуют о том, что свойства лёссовых просадочных грунтов и, особенно, их поведение под нагрузкой и замачиванием, изучены недостаточно. Углубленное изучение тончайших осо-

бенностей структуры лёссовых пород, по-видимому, и является ключом к разгадке проблемы лёссов. Решение этой проблемы позволит достичь существенного прогресса в создании эффективных методов борьбы с просадочностью лёссовых пород, что повысит надежность строительства и исключит возможность разрушения возводимых на этих породах инженерных сооружений.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В России в настоящий момент различные специализированные предприятия в основном занимаются лишь поставкой и арендой зарубежных машин и оборудования по укреплению и стабилизации различных грунтов для усиления оснований зданий и сооружений. Ранее попытки разработки и запуска в производство отечественных подобных машин не увенчались существенным успехом, потому что, зачастую, были трудоемкими в изготовлении, громоздкими, металлоемкими и энергоемкими, имели высокую стоимость.

Сейчас существует множество эффективных зарубежных машин известных фирм с различными показателями для всех случаев укрепления и стабилизации грунтов при строительстве и реконструкции объектов различного назначения. Все они, безусловно, хороши, но у них очень высокие стоимость и накладные расходы [3, 4].

В этом плане одним из перспективных и экономичных направлений видится использование отечественной техники и оборудования, которые могли бы при соответствующей модернизации и усовершенствовании выполнять по соответствующим технологиям рабо-

ты по укреплению грунтов, в том числе и лессовых, механизированными способами для усиления оснований зданий и сооружений и обеспечат снижение трудозатрат, экономию материальных и финансовых ресурсов.

В настоящее время на строительном факультете АлтГТУ им. И.И. Ползунова проводится научно-исследовательская работа по поиску и модернизации вариантов технических и технологических решений использования серийных отечественных установок и оборудования для укрепления и стабилизации лёссовых грунтов механизированными способами в условиях Западной Сибири и Алтайского края.

ОБЗОР И АНАЛИЗ МЕХАНИЗИРОВАННЫХ СПОСОБОВ УКРЕПЛЕНИЯ ЛЕССОВЫХ ГРУНТОВ

Познание глубинной природы просадочности лёссовых пород позволит разрабатывать эффективные инженерные методы борьбы с просадочностью.

В настоящее время эти методы в основном сводятся к воздействию на неустойчивую специфическую структуру лёсса и трансформации ее в устойчивое недеформируемое состояние. При этом, исходя из сущности механизма просадки, специалисты стремятся повысить плотность лёссового грунта (снизить его активную пористость) и увеличить прочность контактов между минеральными частицами (перевести менее прочные, обратимые по отношению к воде, переходные контакты в более прочные - фазовые) [1, 5].

Наиболее распространёнными способами борьбы с просадкой лёссов являются:

- 1) Предварительное замачивание;
- 2) Поверхностное механическое уплотнение (трамбование и вытрамбовывание тяжелыми трамбовками);
- 3) Глубинное уплотнение лёсса грунтовыми сваями;
- 4) Уплотнение лёссового грунта взрывом;
- 5) Устройство грунтовых подушек;
- 6) Термическая обработка;
- 7) Глинизация;
- 8) Битумизация;
- 9) Силикатизация;
- 10) Смолизация;
- 11) Разрядно-импульсная технология (РИТ);
- 12) Струйная (напорная) цементация.

Практически все эти способы выполняются при помощи специальных машин, устройств и оборудования и, следовательно, могут быть отнесены к категории механизированных способов укрепления лёссовых грунтов. Поскольку лёссовые грунты в различных

местах залегания не одинаковы по структуре и возводимые на них объекты различны, то, естественно, в разных условиях необходимо использовать различные способы укрепления. Рассмотрим и проанализируем наиболее эффективные и широко используемые механизированные способы укрепления лёссовых грунтов.

Наиболее распространенным механизированным способом укрепления лёссовых грунтов является механическое поверхностное уплотнение тяжелыми трамбовками. Поверхностное уплотнение трамбовками в период производства земляных работ вполне эффективно, поскольку лёсс, имея в своём составе крупные поры, легко уплотняется (уменьшается количество пор) (рисунок 1).

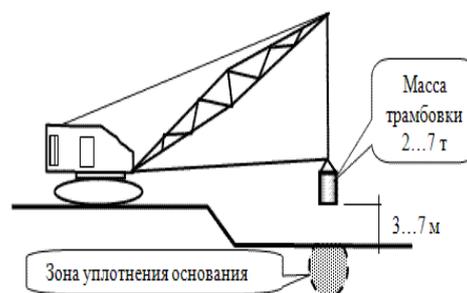


Рисунок 1 - Схема устранения просадочности лёссового грунта методом механического поверхностного уплотнения трамбовками

Поверхностное уплотнение тяжелыми трамбовками позволяет уплотнить толщу лёссового грунта на глубину до 3,5 м. Недостатком данного способа является влияние динамических воздействий на близко расположенные здания и сооружения. Кроме того, этот способ уплотнения является, как правило, сезонным видом работ и выполнение его в осенне-зимнее время отличается невысоким качеством и приводит к появлению недопустимых деформаций [1].

Если необходимо ликвидировать просадочные свойства лёссовых грунтов на глубину до 25 м, то проводят их глубинное уплотнение грунтовыми набивными сваями или энергией взрыва. Технология изготовления грунтовых свай заключается в следующем: в лёссовый грунт забивают металлические сваи (трубы с закрытым концом) – происходит частичное уплотнение грунта и устранение просадочности лёсса, расположенного вдоль трубы. Затем трубы вынимают, а в полученные скважины трамбуется грунт с небольшим количеством воды (рисунок 2).

ИССЛЕДОВАНИЯ И ВЫБОР ОПТИМАЛЬНЫХ ВАРИАНТОВ МЕХАНИЗИРОВАННЫХ СПОСОБОВ УКРЕПЛЕНИЯ ЛЕССОВЫХ ГРУНТОВ ОСНОВАНИЙ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ В УСЛОВИЯХ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ

Длина трубы выбирается из условия проходки лёссовой просадочной толщи, в результате получается грунтовая свая, опирающаяся своим концом на непросадочный грунт. Недостатки этого способа те же, что и у предыдущего способа [5].

Уплотнение лёссового грунта энергией взрыва эффективно при освоении новых (не застроенных) территорий. Взрывами уплотняются большие объемы грунта, с использованием предварительно пробуренных шпуров, в которые помещаются взрывчатые вещества (В.В.). Использование В.В. требует особого подхода к решению поставленных инженерных задач (т.е. специальные организации – дополнительный субподрядчик и т.п.) и связано с повышенным риском в период производства взрывных работ. Иногда используется как вариант устройства грунтовых свай (рисунок 3).

Устранить просадочность лёссового грунта можно использованием грунтовых подушек из непросадочного грунта. В этом случае котлован под проектируемое сооружение

выкапывается в лёссовом основании ниже (до 2 м) отметки заложения подошвы фундамента (рисунок 4).

Вынутый грунт послойно (по 0,5 м) укладывается в котлован с уплотнением каждого слоя катками до плотности сухого грунта (γ_d) не менее 16,5 кН/м³. В результате под подошвой фундамента создаётся грунтовая подушка из непросадочного грунта, на которую и устанавливается фундамент. Способ этот прост и довольно дешёв, иногда его комбинируют с уплотнением трамбовками [1].

Одним из способов борьбы с просадочностью является термическое закрепление лёссовых грунтов. Термическая обработка (обжиг) как метод устранения просадочности лёссового грунта, используется в основном для устранения аварийных ситуаций эксплуатируемых сооружений. Исследованиями установлено, что при температуре свыше $t=+400^{\circ}\text{C}$ лёсс теряет свои просадочные свойства (некоторая аналогия с обжигом кирпича) и превращается в обычный суглинок (рисунок 5).

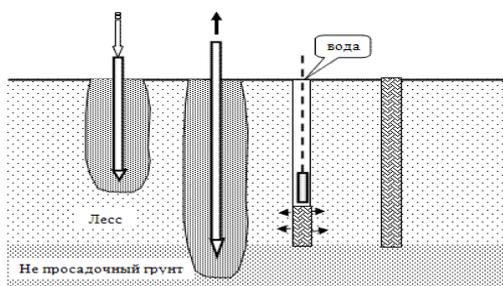


Рисунок 2 - Схема технологической последовательности выполнения грунтовых свай для уплотнения верхней толщи лёссового основания

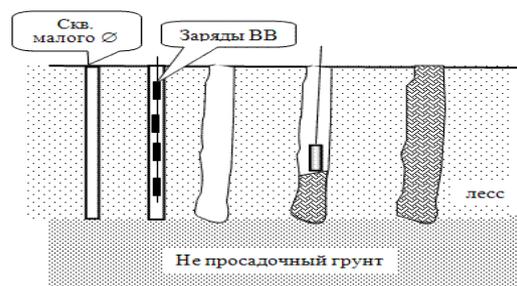


Рисунок 3 - Схема технологической последовательности выполнения уплотнения верхней толщи лёссового основания с использованием энергии взрыва

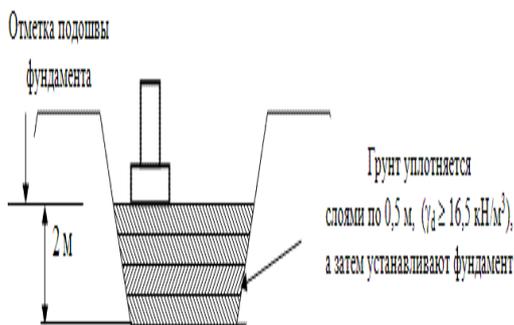
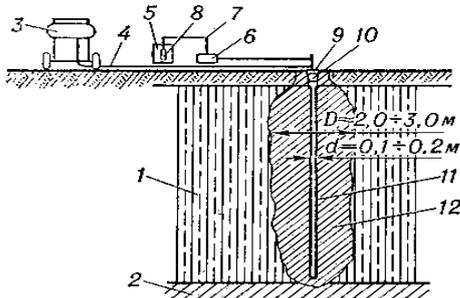


Рисунок 4 - Схема устранения просадочности лёссового грунта способом устройства грунтовых подушек

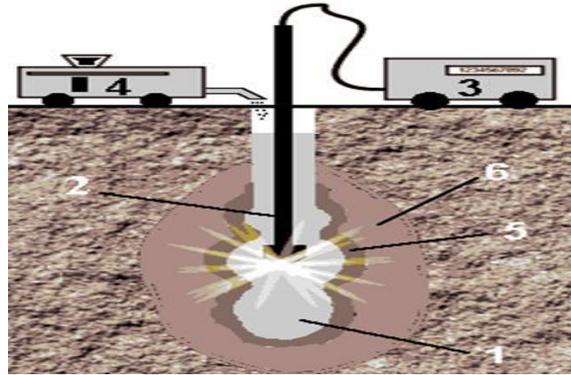


1 - просадочный грунт; 2 - непросадочный грунт; 3 - компрессор; 4 - трубопровод для холодного воздуха; 5 - ёмкость для жидкого горючего; 6 - насос для подачи горючего в скважину; 7 - трубопровод для горючего; 8 - фильтр; 9 - форсунка; 10 - затвор с камерой сгорания; 11 - скважина; 12 - зона термического закрепления грунта

Рисунок 5 - Схема установки для термического закрепления просадочных лёссовых грунтов сжиганием топлива непосредственно в скважине

Технологическая последовательность операций следующая: в устье скважины помещается форсунка. Через форсунку насосом подается горючее с воздухом. В устье скважины поджигается факел, который с течением времени создает в лёссовом грунте обожжённый столб. При горении факела, температура в устье скважины составляет от +400°С до 1000°С. При такой температуре через определенное время образуется прочный ($P \geq 1 \text{ МПа}$), обожжённый массив диаметром до 3 м, с граничной температурой +400°С. Под действием высокой температуры происходит оплавление и спекание минералов на контактах между отдельными частицами и агрегатами частиц и формируются прочные фазовые контакты кристаллизационного типа, устойчивые по отношению к воздействию воды. В результате существенно повышается прочность лёссового грунта и он становится непросадочным [1, 5].

Еще одним из прогрессивных и оправдавших себя механизированных методов укрепления лёссовых грунтов является метод разрядно - импульсной технологии (сваи-РИТ). Сущность его заключается в следующем. Скважина, заполненная мелкозернистым бетоном или цементным раствором, обрабатывается серией высоковольтных электрических разрядов. При этом возникает электрогидравлический эффект, в результате которого формируется тело сваи или корня анкера, цементируется, уплотняется окружающий грунт. Первоначальный диаметр скважины 130...300 мм в результате обработки рас-



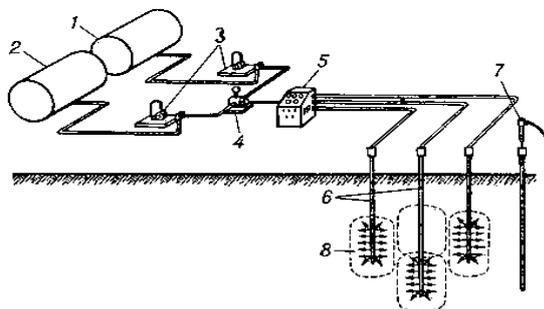
1 - ствол сваи после обработки; 2 - излучатель энергии; 3 - разрядная станция; 4 - растворонасос; 5 - зона цементного грунта; 6 - зона уплотнения грунта

Рисунок 6 - Схема укрепления лёссовых грунтов методом РИТ

четной серией разрядов может быть увеличен, в зависимости от энергии, подаваемой в скважину и гидрогеологических условий площадки, более чем в 2 раза. Окружающие грунты уплотняются, снижается пористость в зоне воздействия ударного импульса. Динамические воздействия, возникающие в процессе формирования, за пределами зоны обработки незначительны и не оказывают вредного воздействия на усиливаемые конструкции и рядом стоящие здания. Разрядно-импульсная технология экологически безвредна, позволяет свести к минимуму земляные работы и водопонижение при строительстве нулевого цикла, производить работы из подвала (высотой не менее 2,4 м), цокольного или первого этажа, не создавая неудобства жителям вышележащих этажей и окружающих зданий (рисунок 6).

Просадочность многих типов лёссовых отложений может быть также существенно уменьшена с помощью метода силикатизации. При этом в грунт через перфорированные трубы с одной стороны нагнетают раствор силиката натрия (жидкого стекла), а с другой - раствор хлористого кальция. При соединении обоих растворов в порах просадочного грунта образуется водонерастворимый гель кремниевой кислоты, который цементирует грунт и делает его непросадочным (рисунок 7). Необходимо отметить, что для лёссовых (химически активных) грунтов, в составе которых содержатся соли кальция (CaSO_4), чаще используется однорастворный метод силикатизации.

ИССЛЕДОВАНИЯ И ВЫБОР ОПТИМАЛЬНЫХ ВАРИАНТОВ МЕХАНИЗИРОВАННЫХ СПОСОБОВ УКРЕПЛЕНИЯ ЛЕССОВЫХ ГРУНТОВ ОСНОВАНИЙ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ В УСЛОВИЯХ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ



1 - цистерна с крепителем; 2 - цистерна с кислотой; 3 - насос «НД»; 4 - смеситель; 5 - пульт управления с регистрирующей аппаратурой; 6 - иньектор; 7 - отбойный молоток для погружения иньектора в грунт; 8 - контур закрепления

Рисунок 7 - Схема установки для силикатизации грунтов



Рисунок 9 - Высокоточная струя цементного раствора

В этом случае в закрепляемое основание нагнетается лишь раствор кремневой кислоты (силиката натрия), который, взаимодействуя с солями кальция, образует водонерастворимый гель. Нагнетание производят медленно (2...5 л/мин), чтобы обеспечить равномерное впитывание растворов в грунт по всей зоне закрепления. К сожалению, способ силикатизации грунтов в некоторых случаях может приводить к сильному химическому загрязнению закрепляемых лессовых пород, и поэтому в настоящее время он применяется не очень часто. Кроме того, этот способ имеет достаточно высокую стоимость и сложность контроля сплошности закрепляемого массива грунта [4].

Из всего диапазона существующих в настоящее время методов и технологий по укреплению и стабилизации различных грунтов, в том числе и лессовых, для усиления оснований зданий и сооружений в условиях г.

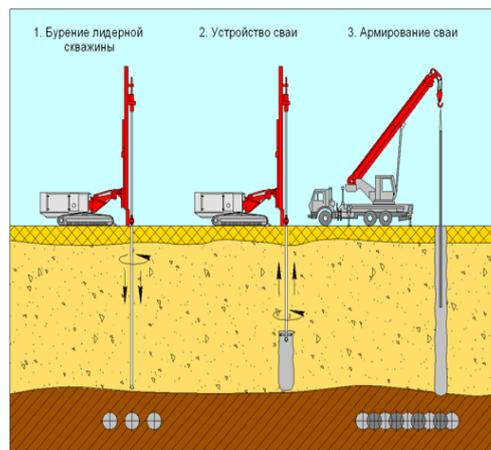


Рисунок 8 - Технологическая карта устройства грунтоцементных свай методом струйной цементации (jet-grouting)

Барнаула и Западной Сибири наиболее приемлемым является метод струйной (напорной) цементации.

Технология струйной цементации грунтов появилась практически одновременно в трёх странах - Японии, Италии, Англии около 10 лет назад. Однако до этого технология была разработана в СССР ещё в 1980 году институтом «Гидроспецпроект». Данная технология не получила распространения из-за отсутствия на тот момент материалов и технологий для производства и изготовления необходимого технического и рабочего оборудования [3, 4].

Струйная технология цементации грунтов (jet-grouting) высокопроизводительна, позволяет создавать грунтоцементные конструкции различных размеров и форм (сваи, горизонтальные или наклонные площадки, стенки, своды и др.) на различной глубине, проводить работы с дневной поверхности или из подвалов и т.п. помещений, что особенно важно в стеснённых городских условиях, не ухудшает экологическую обстановку.

Несомненным достоинством струйной технологии является её гибкость, манёвренность, возможность оперативно, по мере необходимости, корректировать принятые технологические режимы [4, 5].

Разрушение и перемешивание грунта по этой технологии осуществляется высокоточной струей цементного раствора, исходящего под высоким давлением из монитора, расположенного на нижнем конце буровой колонны. В результате в грунтовом массиве формируются сваи диаметром 0,6-1,0 м из нового материала - грунтобетона с достаточ-

но высокими несущими и противофильтрационными характеристиками (рисунки 8, 9).

Однако, при всех достоинствах технологии струйной цементации (jet-grouting), в настоящее время её применение сдерживает отсутствие надёжного прогноза прочности и геометрических размеров получаемого материала и конструкции, что существенно затрудняет назначение расчетных параметров и проектных характеристик. Кроме этого, не достаточно определены условия применения jet-технологии в сочетании с традиционными технологиями геотехнического строительства.

Недостаточно изучены возможности комплексного использования грунтобетонных и традиционных конструкций в геотехническом строительстве (например, не определены условия оптимального сочетания jet- и буронабивных свай, бетонных и железобетонных ростверков и др.), что также сдерживает применение струйной технологии.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Необходимо расширенное и углубленное изучение тончайших особенностей структуры лёссовых пород Западной Сибири и Алтайского края, которые являются ключом к разгадке проблемы лёссов. Решение этой проблемы позволит достичь существенного прогресса в создании эффективных инженерных методов борьбы с просадочностью лёссовых пород, что повысит надежность строительства и исключит возможность разрушения возводимых на этих породах инженерных сооружений.

2. Требуется дополнительные исследования по поиску и модернизации вариантов технических и технологических решений использования

отечественных машин, установок и оборудования для укрепления и стабилизации лёссовых грунтов, которые в Алтайском крае и Западной Сибири занимают достаточно большие (25-30%) территории. Использование отечественной техники и оборудования позволит при соответствующей их модернизации, усовершенствовании и адаптации выполнять по соответствующим технологиям работы в нашем регионе по укреплению грунтов, в том числе и лёссовых, для усиления оснований зданий и сооружений и обеспечат снижение трудозатрат, экономию материальных и финансовых ресурсов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Швецов Г.И. Лёссовые породы Западной Сибири и методы устройства оснований и фундаментов: монография / Г.И.Швецов. – М.: Высшая школа, 2000. - 244 с.
2. Швецов Г.И. Основные методы устройства оснований и фундаментов на лёссовых просадочных грунтах Алтайского края / Г.И. Швецов, Г.С. Меренцова // Горная промышленность. – 2009. - №5 (87). - с. 66-68.
3. Малинин А.Г. Струйная цементация грунтов: монография / А.Г. Малинин. - Пермь: Пресстайм, 2007. - 168 с.
4. Мангушев Р.А. и др. Современные свайные технологии: Учебное пособие / Р.А. Мангушев, А.В. Ершов, А.И. Осокин; 2-е изд., перераб. и доп. - М.: Изд-во АСВ, 2010. - 240 с.
5. Алексеев С.И. Основания и фундаменты: Учебное пособие для студентов вузов / С.И.Алексеев. – СПб.: Изд-во ПГУПС, 2007. – 111 с.

Лютлов В.Н. – к.т.н., доцент, E-mail: vnlutov@mail.ru, Куликов С.К. – магистрант, Алтайский государственный технический университет.