

6
А-11

**АКАДЕМИЯ НАУК СССР
СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ**

Дальневосточный филиал имени В. Л. Комарова

И. М. ТЮРИН

**Исследование вопросов термического
упрочнения пылеватых суглинков
Дальнего Востока**

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

**диссертации, представленной на соискание
ученой степени кандидата технических наук**

**Научный руководитель —
заслуженный деятель науки и техники РСФСР,
доктор технических наук, профессор**

А. В. ПАТАЛЕЕВ

г. Хабаровск

1965 г.

АКАДЕМИЯ НАУК СССР
СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ

Дальневосточный филиал имени В. Л. Комарова

И. М. ТЮРИН

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОПРОСОВ ТЕРМИЧЕСКОГО
УПРОЧНЕНИЯ ПЫЛЕВАТЫХ СУГЛИНКОВ
ДАЛЬНЕГО ВОСТОКА

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации, представленной на соискание
ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель —

заслуженный деятель науки и техники РСФСР,
доктор технических наук, профессор

А. В. ПАТАЛЕЕВ

г. Хабаровск

1965 г.

ВВЕДЕНИЕ

В связи с большим объемом строительства с каждым годом все чаще приходится сталкиваться с грунтами, имеющими малую несущую способность, что заставляет прибегать к искусственным мерам повышения прочности оснований.

Не менее серьезные затруднения из-за деформаций земляного полотна встречаются на вновь строящихся и эксплуатируемых автомобильных и железных дорогах, возведенных из глинистых грунтов.

При внимательном рассмотрении предлагаемых и ныне используемых способов глубинного упрочнения глинистых грунтов можно отметить, что почти все они предназначены для лессовых просадочных пород. На долю не лессовых глинистых грунтов, у которых при замачивании также резко снижается механическая прочность, практически остаются электрохимический и термический методы.

Такое положение обусловлено особенностями обычных глин и суглинков, исключающие возможность применения инъекционных способов упрочнения.

Если эффективность электрохимического метода упрочнения грунтов считается более или менее доказанной, то изучение применимости термического способа для повышения водостойкости и механической прочности не лессовых глинистых грунтов, строго говоря, только начинается. В связи с чем имеется множество нерешенных вопросов, выяснение которых способствовало бы развитию указанного метода как в области теории, так и в практике. Потребность в эффективном и надежном способе повышения прочности природных грунтов в промышленном и гражданском строительстве, а также для стабилизации деформирующегося земляного полотна шоссейных и железных дорог на Дальнем Востоке не меньшая, чем в других районах страны.

Научного исследования вопросов использования термического метода для упрочнения глинистых грунтов Дальнего Во-

стока до настоящего времени не производилось, хотя первое практическое применение упомянутый метод нашел на Дальнем Востоке (1896—1898 гг.).

В связи с указанным в работе решались следующие задачи:

1. Изучение химико-минералогических и физико-механических свойств естественных и термических упрочненных пылеватых суглинков.

2. Конструирование обжигового оборудования и определение норм расхода воздуха и топлива.

3. Укрепление термическим способом сплывающего участка откоса жел. дор. выемки.

4. Изучение закономерности в распределении температур в обжигаемой массе и определение математической зависимости диаметра термосвай от продолжительности термообработки.

5. Теоретическое определение несущей способности упрочненных масс суглинка (термосвай) под вертикальной и горизонтальной нагрузками.

6. Определение технико-экономической целесообразности применения термического метода для упрочнения пылеватых суглинков.

1. История и современное состояние вопроса по термическому упрочнению глинистых грунтов

Впервые у нас в стране термический способ был использован на практике около 80 лет назад. За истекший период этот метод прошел несколько этапов развития.

Первый период охватывает 1888—1900 гг., когда термический метод был использован для борьбы с деформациями железнодорожного земляного полотна.

Второй период истории развития метода продолжался с 1926 г. по 1938 г.

Первые научные исследования были начаты в 1926 г. в Ленинграде группой ученых (Охотин В. В., Рутковский, Яновский) под руководством проф. П. А. Земятченского.

Начиная с 1927 г., в Москве группа исследователей (Безрук В. М., Руднев и др.) под руководством проф. М. М. Филатова занималась разработкой теоретических основ улучшения обжигом глинистых дорог, выяснением изменений фи-

зико-механических свойств термоупрочненных грунтов, разработкой технологии обжига грунтов.

К 1934 г. было выяснено, что легкие и средние суглинки и глины, лессовые и моренные суглинки и черноземы при их термической обработке теряют пластические свойства, набухаемость, размокаемость, липкость, повышается механическая прочность на сжатие.

Начало третьему периоду в развитии термометода было положено Н. А. Осташевым в 1934 г., которым предлагалось производить глубинное упрочнение лессовых просадочных грунтов с помощью горячего (600—800°) воздуха, подаваемого в закрытые буровые скважины.

В 1947 г. И. М. Литвиновым, А. Ф. Беляковым и П. К. Черкасовым было предложено получать горячие газы в самой скважине за счет сжигания топлива в специальной камере сгорания, закрывающей устье скважины. Этот способ оказался перспективным, и он породил многие изобретения и предложения, как в области конструирования обжигового оборудования, так и в технологии производства работ.

В 1959—1961 гг. фундаментпроектом разработан способ зонального бескамерного обжига.

Применение термического метода упрочнения не ограничивалось только основаниями под фундаменты промышленных и жилых зданий.

С 1948 по 1952 гг. под руководством И. А. Клевцова на одном из участков Юго-Западной дороги была осуществлена крупная работа по закреплению оползневого склона обжигом из штолен. Перспективной была работа Н. А. Сокова на Донецкой ж. д. по стабилизации железнодорожных насыпей (1954—1955 гг.), выполненной из наклонных боковых скважин по способу И. М. Литвинова и др.

Лечению неустойчивых участков жел. дор. полотна посвящены работы Н. Г. Грушевого, А. Г. Савченко, которые помогают расширить области применения термического метода на водонасыщенные глинистые грунты.

На основе советского опыта серьезные успехи в деле теории и практики упрочнения грунтов термическим способом достигнуты в Чехословакии, Румынии, Венгрии.

Несмотря на большой практический опыт применения термометода в различных грунтах и накопленный лабора-

торный материал при более внимательном рассмотрении проблемы, можно обнаружить ряд вопросов, решения которым нет или имеются временные ответы.

В настоящее время отсутствует единая методика исследования термически упрочненных грунтов.

Не имеется стройной теории термического упрочнения природных грунтов.

Весьма интересной проблемой является искусственное внесение в грунт в процессе обжига различных химических добавок, которые способствовали бы снижению температур обжига и получению более плотного и прочного материала. Имеет приблизительное решение вопрос о продолжительности термообработки грунтов. Серьезной задачей является разработка строгих методов расчета несущей способности отдельных термосвай, кустов термосвай, подпорных стен из упрочненных грунтов и контрфорсов в теле насыпей жел. дор. полотна, дренажей из термоупрочненных грунтов. Значительной работой, которая может сыграть очень важную роль в прогрессировании термометода, является конструирование современного обжигowego оборудования с использованием автоматики и телемеханики.

II. Климат, грунты и грунтовые воды г. Хабаровска и его района

Климат Хабаровского края и района является довольно суровый, с холодной малоснежной зимой, затяжной холодной весной, что способствует глубокому сезонному промерзанию грунтов. Последнее обстоятельство обуславливает пучение, морозобойную трещиноватость и своеобразную брекчиевидную (комковатую) структуру грунтов. Летний период характеризуется обилием дождей, вызывающих переувлажнение пылеватых суглинков. Указанные факторы являются наиболее важными причинами деформации оснований промышленных и гражданских зданий, а также автомобильного и железнодорожного земляного полотна. Из подземных вод в пылеватых суглинках практическое значение имеет верховодка, образующаяся за счет атмосферных осадков и частично от конденсации паровой воды. Появление верховодки в суглинках отрицательно отражается на их прочностных характеристиках. Все вышесказанное имеет непосредственное значение и для термически упрочняемых масс суглинка, которые будут

находиться в среде обычного грунта и подвергаться воздействию упомянутых природных факторов в процессе эксплуатации.

III. Физико-механические и химико-минералогические характеристики пылеватых суглинков

Для определения названных характеристик из семи участков (районов) г. Хабаровска было отобрано более 2,5 тыс. образцов суглинка без нарушения природной структуры. В работе дается инженерно-геологическая характеристика пунктов отбора образцов грунта. Исследованию подвергались суглинки делювиальных и аллювиальных отложений. Большого различия между указанными видами грунтов не наблюдалось. Упомянутые грунты служат в большинстве случаев основаниями для промышленных и гражданских объектов строительства, из этих же суглинков воздвигнуто земляное полотно существующих шоссе и железных дорог.

По материалам изучения состава и свойств естественных грунтов можно сделать следующие обобщения.

Влажность суглинков в природном залегании изменяется от 17 до 40%, соответственно и консистенция грунтов может быть полутвердой и мягкопластичной. При влажности порядка 37—40% наблюдается сплывание грунта с откосов выемок и насыпей.

Влажность границы текучести для суглинков находится в пределах 30—39%, границы раскатывания 18—21%. Число пластичности лежит в границах 11—18%.

Воздушная усадка природных грунтов невелика — 2—9%, иногда доходит до 13—20%.

Набухаемость сухих суглинков превосходит величину усадки и имеет значения от 13 до 32%. Влажность набухания (максимально возможная влагоемкость суглинков без разрушения их природной структуры) достигает 23—34%, что больше природной влажности на 3—14%.

Образцы пылеватых суглинков, имеющих влажность 19—27%, разрушаются в воде довольно быстро, за 17—66 мин. Сухие грунты размокают в 3—5 раз быстрее.

Гранулометрический состав пылеватых суглинков сравнительно однообразен. Глины содержится 20—35%, песка мало (10—15%) и очень много пылевой фракции (50—80%), которая во многом и определяет физические и механические свойства грунтов.

Объемный вес суглинков имеет малый разброс значений (1,95—2,04 г/см³). Объемный вес скелета грунта изменяется от 1,57 до 1,67 г/см³. Удельный вес лежит в пределах от 2,68 до 2,72 г/см³.

Пористость твердых и полутвердых грунтов равна 35—40%, при увлажнении она возрастает на 2—6%.

Минералогический состав пылеватых суглинков характеризуется большим содержанием кварца, сконцентрированным в основном в песчаной (32—73%) и пылевой (39—74%) фракциях. Много в песке полевого шпата (11—28%), гидроокислов железа (3—42%) и ряда других минералов. В пылевой фракции возрастает роль полевого шпата, слюды, появляются минералы глин и резко уменьшаются гидроокислы железа и марганца.

В глинистой фракции определяющим минералом является иллит (гидрослюда типа мусковита) с примесью опала, то есть пылеватые суглинки Хабаровского района относятся к гидрослюдистому типу глинистых грунтов.

Химический состав суглинков свидетельствует о большом содержании кремнезема (63—67%) и небольшом глинозема (15—19%). В норме имеются окислы железа (4,4—7%), титана (0,65—1,38%), марганца, магния, кальция, калия, натрия и других соединений.

По содержанию перечисленных компонентов пылеватые суглинки относятся к группе легкоплавких керамических глин.

Химический анализ глинистых фракций суглинков показывает на большое уменьшение кремнезема и увеличение глинозема. В глине возрастает содержание плавней.

По водородному показателю пылеватые суглинки в основном относятся к кислым грунтам, хотя могут встречаться и щелочные разновидности.

В обменный комплекс пылеватых суглинков входят катионы кальция, калия, магния, натрия, алюминия. Емкость поглощения рассматриваемых грунтов (22—41 мл-экв) — характерна для гидрослюдистых глин.

Пределы прочности пылеватых суглинков на одноосное сжатие, имеющих естественную влажность, невелики (2—4 кг/см²). У сухих образцов грунта прочность возрастает в 5—8 раз.

Компрессионная сжимаемость природных грунтов сравнительно небольшая (17—43 мм/м), при водонасыщении она увеличивается в 2—3,5 раза.

Сопrotивляемость сдвигу суглинков с природной влажностью средняя. Удельное сцепление лежит в пределах от 0,7 до 1 кг/см², коэффициент внутреннего трения имеет значения от 0,3 до 0,77 и угол внутреннего трения изменяется от 15,6 до 37,6°.

При замачивании грунтов резко снижается как сцепление (в 1,5—5,6 раза), так и внутреннее трение (в 1,6 раза).

Из всего сказанного нетрудно заметить, что при замачивании у пылеватых суглинков существенно ухудшаются все физические и прочностные показатели. Следствием переувлажнения и являются наблюдаемые деформации грунтовых сооружений и естественных оснований под фундаментами различного рода объектов, предотвращение которых возможно с применением методов повышения водостойкости и прочности грунтов.

IV. Физико-химические свойства термически упрочненных суглинков

В указанной главе изложены результаты исследования изменений физических свойств пылеватых суглинков, происходящие в грунтах после их термообработки при температурах от 100 до 1.000°. Эти изменения являются отражением сложных химических преобразований, наблюдающихся при нагревании минеральной части грунтов.

Физические характеристики определялись на образцах грунта с ненарушенной природной структурой по методикам, применяемым для изучения керамических, дорожных, грунтовых материалов, а также использовались методы химии, минералогии и петрографии. В работе изложены методы подготовки образцов грунта к термообработке и сам процесс термического упрочнения в лабораторных условиях.

Результаты исследования сводятся к следующему.

После прогревания (100—300°) пылеватые суглинки, относящиеся к кислым гидрослюдистым грунтам, частично теряют свои пластические свойства, уменьшается набухание, влагоемкость, гигроскопичность, пористость, однако приобретенные свойства являются в большей мере обратимыми. Поэтому упомянутый температурный интервал для пылеватых суглинков практического значения не имеет.

У суглинков, прошедших термообработку при 400—500°, появляются необратимые во времени свойства полускальных грунтов. Исчезает пластичность, набухаемость, появляется морозостойкость (от 5 до 25 циклов теплосмен) материала. Указанные температуры будут являться нижним пределом термической обработки природных грунтов.

Наибольшей плотностью (34—39%) суглинки обладают после обжига при 500°. При этой же температуре наблюдается и больший объемный вес (2,02—2,09 г/см³). При более высоких температурах нагревания (600—800°) заметно увеличение пористости и снижение объемного веса.

Минимальная пористость (27—38%) получается у суглинков, обожженных при 1 000°, а объемный вес изменяется от 2,01 до 2,16 г/см³.

Удельный вес упрочняемых суглинков с увеличением температур обжига постепенно снижается и при 1 000° имеет наименьшие (2,63—2,67 г/см³) значения.

Гранулометрический состав суглинков, обжигаемых в монолитах, изменяется по схеме суглинок—песок, дресва, щебень—монолит. Переходы суглинков в монолит происходят при температурах 400—600°.

Рыхлые (порошкообразные образцы) суглинки при обжиге переходят в пыль и песок, и только при 900—1 000° происходит спекание грунта в монолитную массу.

Минимальное (17—21%) водопоглощение наблюдается у суглинков упрочненных при температурах 400—600°.

В этом интервале влагоемкость уменьшается (по сравнению с наибольшей) в 1,2—1,44 раза. При более высоких температурах нагревания влагоемкость немного (на 1—3%) возрастает. При 800—1 000°, наоборот, происходит снижение водопоглощения (по сравнению с максимальной для каждого вида суглинка) в 1,24—2,3 раза, что связано с уменьшением пористости упрочненных грунтов.

Увеличение влагоемкости во времени (которое наблюдалось в течение восьми лет) у термически упрочненных (500—1 000°) пылеватых суглинков идет со скоростью 0,1—0,2% в год.

Термически упрочненные суглинки обладают хорошей (0,5—9,1 м/сутки) фильтрационной способностью, что может быть использовано для дренирования глинистых водонасы-

щенных грунтов. Помимо этого термообработанные грунты обладают лучшей испаряющей способностью воды, чем естественные суглинки. Это свойство можно оценить как положительное, которое будет способствовать более быстрому осушению природного грунта, окружающего термически упрочненные массы суглинка.

V. Прочностные характеристики термически упрочненных пылеватых суглинков

Повышение механической прочности и водостойкости природных глинистых грунтов является главной задачей при использовании термического метода упрочнения.

1. Пределы прочности суглинков (при одноосном сжатии) после прогревания (100—400°) грунтов возрастают в 8—15 раз по сравнению с естественным грунтом.

Временное сопротивление сжатию сухих обожженных грунтов увеличивается в 18—23 (500°) и в 40—54 (1.000°) раза.

Под влиянием воды прочность термообработанных суглинков снижается.

У суглинков обожженных при 500—700° коэффициент размягчения изменяется от 0,30 до 0,93, при температурах 800—1.000° от 0,76 до 1,0.

В целом прочность водонасыщенных упрочненных грунтов превышает таковую для естественных суглинков в 3—5 (400°) и в 47 (1.000°) раз. Начиная с 500°, все разновидности термоупрочненных (водонасыщенных) суглинков приобретают прочность (18—60 кг/см²) полускальных грунтов, а после термообработки при 800° и выше имеют прочность (44—99 кг/см² при 800° и 94—198 кг/см² при 1 000°) скальной размягчаемой породы.

2. Сопротивляемость сдвигу термоупрочненных суглинков, по сравнению с природными, всецело зависит от температуры нагревания.

Определение сдвиговых характеристик производилось на одноплоскостном приборе Н. Н. Маслова с усилением некоторых узлов. Автором были предложены специальные приспособления и методы подготовки к испытанию образцов упрочненных суглинков как геометрически правильной, так и произвольной формы.

Прогрев суглинков при 300° дает прирост удельного сцепления в 1,3—2,1 раза, по сравнению с замоченными природными грунтами.

У грунтов, прогретых при 400°, заметно увеличивается внутреннее трение (в среднем в 1,8 раза) и особенно удельное сцепление (в 5 раз).

После обжига грунтов при температурах от 500° до 800—900° силы внутреннего трения возрастают в 2,6—4,5 раза, а структурное сцепление в 10—20 раз.

Угол внутреннего трения у обожженных суглинков изменяется в пределах 30—61° (500°), 50—62° (900°), удельное сцепление соответственно от 1,22—6,25 кг/см² до 5,09—9,28 кг/см².

По результатам испытаний термически упрочненных суглинков на сдвиг и одноосное сжатие между указанными показателями может быть установлена (в первом приближении) эмпирическая зависимость:

$$C = 0,1 \cdot R_{сж} \quad (1)$$

где: C — удельное сцепление;

$R_{сж}$ — предел прочности на сжатие.

Недоучет сил трения войдет в запас надежности расчета.

3. Сжимаемость термически упрочненных пылеватых суглинков без возможности бокового расширения определялась на водонасыщенных образцах грунта, прошедших термообработку при 200—900°.

Низкотемпературная (200—300°) обработка суглинков увеличивает их сжимаемость (в 1,4—2,1 раза) по сравнению с природными водонасыщенными грунтами.

При обжиге грунтов в тепловом интервале 400—500° модуль осадки снижается в 4—6 раз, а после термообработки при 800—900° сжимаемость (5,3—14,8 мм/м) упрочненных суглинков становится меньше, чем у естественных (35—144 мм/м) грунтов, в 7—10 раз.

4. Исходя из предпосылки, что прочность термически обработанных грунтов зависит от внутренней и внешней прочности глинистого материала, который является таким же вяжущим веществом, как, например, цемент в бетоне или растворе, после испытания серии образцов на разрыв и сжатие удалось получить эмпирические зависимости прочности конгломератного материала (грунта) от процентного содержания глины и песка.

Полученные результаты довольно хорошо выражаются следующими формулами:

$$R_p = \frac{R_k}{1 + 1,5 \left(2 \frac{p}{g} - \sqrt{\frac{p}{g}} \right)} \quad (2)$$

$$R_c = 5 \cdot R_p; \quad (3)$$

где: R_p — предел прочности термообработанного грунта на растяжение;

R_k — предел прочности на растяжение обожженной глинистой составляющей грунта (когезионная прочность);

p — содержание песка в грунте в %;

g — содержание глины в грунте в %;

R_c — предел прочности на сжатие термообработанного грунта.

5. Расчетные сопротивления на сжатие у термически упрочненных (водонасыщенных) грунтостолбов или правильней назвать термосвай (по сходству работы со свайей трения) могут быть приняты равными от 10 до 25 кг/см², что превышает нормативные давления на природные пылеватые суглинки в 10 раз.

Сдвиговые расчетные характеристики для материала (водонасыщенного) термосвай превосходят таковые значения природных водонасыщенных суглинков также в 10 раз.

Для практических расчетов конструкций из термически упрочненных суглинков на горизонтальные нагрузки, удельное сцепление может иметь значения от 1 до 3 кг/см², угол внутреннего трения колеблется в пределах от 32 до 52°.

Модуль деформаций материала термосвай из упрочненных суглинков при вертикальном давлении 10 кг/см² (наименьшем расчетном давлении на упрочненные грунты) изменяется от 330 до 540 кг/см², что превышает аналогичный показатель для естественных суглинков в 4 раза, то есть сжимаемость термосвай снижается в названное число раз.

6. На основании вышеприведенных материалов сделана попытка определения несущей способности термосвай под вертикальной и горизонтальной нагрузками.

За расчетную схему работы упрочненного столба грунта принята схема работы забивной свай с некоторыми дополнениями.

Принятая схема учитывает совместную работу термосвай и грунта, окружающего ее.

Вертикальная нагрузка (N), приложенная к термосвае, будет восприниматься сопротивлением основания (P_0), сложенного природным грунтом, сопротивлением сдвигу (P_c) природного грунта по боковой поверхности термосваи и пассивным давлением стенок грунтовой обоймы или отпором природного грунта (E_0).

$$\text{Тогда: } N = P_0 + P_c + E_0 \quad (4)$$

После подстановки значений всех составляющих и необходимых преобразований величина (N) будет иметь значение:

$$N = \frac{R_n \cdot F_c + F_b (c + P_p)}{1 - \operatorname{tg} \Phi \sin e} \quad (5)$$

где:

R_n — нормативное давление на грунт основания, определяемое по СНиП П-Б 1—62;

F_c — усредненная площадь поперечного сечения термосваи;

F_b — площадь боковой поверхности термосваи;

c — удельное сцепление естественного грунта;

P_p — удельное пассивное давление связного грунта;

Φ — угол внутреннего трения природного водонасыщенного грунта;

$\operatorname{tg} \Phi$ — коэффициент внутреннего трения;

e — угол наклона боковой поверхности термосваи к вертикали.

Допустимая нагрузка на термосваю, имеющей средний диам. 1,9 м и высоту 2,3 м, подсчитанная по формуле (5), получилась равной 369 т.

Допустимая нагрузка на забивную сваю с вышеуказанными размерами, рассчитанная по соответствующим нормам (СНиП П-Б 5—62), равна 164 т.

7. На горизонтальную нагрузку термосваи будут работать при использовании их для образования подпорных стен с целью удержания оползневых масс грунта на деформирующихся откосах выемок, насыпей, оползневых склонах и т. п.

При выполнении вышеуказанной функции термосваи должны пройти через сползающий слой грунта и войти в нарушенную массу грунта на расчетную глубину.

Горизонтальное давление на термосваю (T), оказываемое сплывающим грунтом, будет стремиться срезать верхнюю часть упрочненного столба грунта в плоскости скольжения и повернуть термосваю в сторону склона откоса.

Действующее давление будет восприниматься, в основном, силами трения ($\operatorname{tg} \Phi$) и сцепления (c) обожженного грунта термосваи.

Это условие может быть выражено формулой:

$$T = 0,8F (P \cdot \operatorname{tg} \Phi + c) \quad (6)$$

где:

T — сдвигающее давление на термосваю;

F — площадь среза термосваи в плоскости скольжения сползающей массы грунта;

P — удельное вертикальное давление на плоскость среза от собственного веса части термосваи, лежащей выше плоскости среза;

$\operatorname{tg} \Phi$ и c — коэффициенты внутреннего трения и сцепления термоупрочненного грунта;

0,8 — коэффициент запаса устойчивости на сдвиг.

Допускаемая горизонтальная нагрузка на термосваю с вышеуказанными размерами, определенная по формуле (6), равняется 64 т.

Соответствие расчетов по формулам (5) и (6) действительности может быть сделано при испытании термосвай серий пробных нагрузок.

VI. Укрепление участка сплывающего откоса железнодорожной выемки термическим методом

Осенью 1962 г. кафедрой «Основания и фундаменты» в содружестве с работниками 4 дистанции пути и службы пути ДВЖД была выполнена экспериментальная работа по термическому укреплению участка (площадью 180 м²) сплывающего откоса железнодорожной выемки.

Удержание сплывающей массы грунта откоса мощностью до 1 м осуществлено с помощью 15 термосвай, полученных обжигом из буровых скважин глубиной 2 м. Термосваи располагались на участке в шахматном порядке с шагом в 3 м по длине и ширине откоса. Пять рядов термосвай, обладающей высокой сопротивляемостью сдвигу, выполняли функцию подпорных стен.

Каждый цикл обжига (3 скважины) занимал 5 суток, весь объем работы на участке выполнен за 25 суток. Обжиговое оборудование состояло из трех комплектов камер сгорания (конструкции автора) и форсунок, топливо и воздухораспределителей, топливного пневмобака и компрессора КС-9. Конт-

роль за температурой газов, поступавших в скважину, осуществлялся термодарами, вмонтированными в камеры сгорания.

Чистое время обжига грунта (при средней температуре 850°) из скважин колебалось от 41 до 155 ч. Расход горючего (солярного масла) на пог. м скважины составил в среднем 102,5 кг, расход воздуха $60 \text{ м}^3/\text{ч}$.

Стоимость по укреплению грунта откоса составила 4,51 руб. за 1 м^3 .

Диаметры масс суглинка, прошедших термообработку при температурах $400-1000^{\circ}$, изменялись в зависимости от времени обжига от 40 см (41 час) до 220 см (155 часов), соответственно глубина обжига менялась от 100 до 230 см.

По материалам эксперимента получена эмпирическая зависимость диаметра термосвай от продолжительности термообработки грунта.

$$D = 1,68 T - 50,4 \quad (7)$$

где:

D — диаметр (по верху) термосваи в см;

T — продолжительность термообработки грунта в часах.

Предложенная формула может быть использована при продолжительности работ от 2 до 8 суток.

При обжиге суглинков в течение 7—8 суток диаметры термосвай достигнут оптимальных размеров (230—250 см), а высота термосвай будет на 30—50 см больше глубины обжиговой скважины.

Термообработка суглинков свыше 8 суток будет малоэффективной и вызовет излишнее удорожание работ.

По нашим наблюдениям форма упрочненной массы пылеватого суглинка напоминает фигуру параболоида вращения. Такая форма получается во всех случаях, когда в скважину тепло подается сверху — вниз и обуславливается изменениями с глубиной пористости, влажности и газопроницаемости.

Термически упрочненный пылеватый суглинок в разрезе имеет щебневидную структуру с малозаметной микротрещиноватостью.

Трехлетние наблюдения за деформациями термоукрепленного участка показали, что подвижек грунта откоса не происходит.

Экономическое сравнение термического метода упрочнения глинистых грунтов с другими дает следующие результаты. По данным И. М. Литвинова упрочнение лессовых оснований

термическим способом обходится в 4,57 руб. (м^3) (в последние годы снижено до 1,8—2,3 руб.), что дешевле грунтовых свай в 1,35 раза, а силикатизации в 2,34 раза.

Особенно экономичным термический метод становится при использовании его для борьбы с оползневыми явлениями. Так, по данным Н. А. Сокова термоконтрфорсы, примененные для укрепления ж. д. насыпи от расползания, дешевле обычно применяемых поперечных прорезей на 44% и дешевле каменных контрфорсов на 82%. По материалам С. С. Буцько термоконтрфорсы ($4,47 \text{ руб. м}^3$) дешевле прорезей с каменным заполнением в 3,6 раза и прорезей с песчаным заполнением в 2,6 раза.

Сравнение вариантов подпорных стен, запроектированных из термически упрочненного грунта и свай показывает, что термический вариант (10 руб. м^3) дешевле свайной стены в 3,2 раза и подпорной стены из прошивных свай в 7,6 раза. Сравнение термического с другими физико-химическими методами упрочнения дает следующее: двухрастворная силикатизация — 30 руб./ м^3 , однорастворная силикатизация — 8—10, смолизация — 40, цементация — 18, электрохимическое упрочнение — 4—8, термическое упрочнение — 2—10. Следовательно, экономическая эффективность термического метода не уступает другим методам, а в большинстве случаев превосходит их.

ВЫВОДЫ

1. Основным видом грунта, с которыми чаще всего приходится иметь дело строителям и эксплуатационникам Дальнего Востока, являются пылеватые суглинки аллювиального и делювиального происхождения, обладающие рядом отрицательных особенностей, обусловленных генетическим и физико-географическими факторами образования и современного существования, что является причиной разнообразных деформаций как естественных оснований в промышленном и гражданском строительстве, так и различных грунтовых сооружений. Указанное позволило обосновать необходимость постановки и проведения исследования вопросов применения термического метода для упрочнения пылеватых суглинков, как способа борьбы с деформациями земляного полотна железных и шоссейных дорог, а также с целью повышения несущей способности оснований под фундаментами объектов различного назначения в местных грунтовых и климатических условиях.

2. Физические свойства пылеватых суглинков характеризуются большим содержанием пылевой и глинистой фракций и малой примесью песка; наблюдаются в грунтах сравнительно высокая пористость, влажность, объемный и удельный вес и ничтожно малая фильтрационная способность.

3. Минералогический состав суглинков определяется большим содержанием малогидрофильных групп минералов кварца, полевого шпата, гидроокислов железа сконцентрированных в песчаных и пылеватых фракциях. Глинистая составляющая грунтов представлена, в основном, иллитом с примесью опала, вследствие чего исследованные грунты относятся к группе гидрослюдистых (иллитовых) суглинков.

4. Химический состав суглинков характеризуется большим содержанием кремнезема и небольшим глинозема, в норме (для гидрослюдистых глин) имеются окислы железа, титана, марганца, магния, кальция, калия и др.

В глинистой фракции содержание окислов (плавней) увеличивается. Пылеватые суглинки относятся, в основном, к кислым грунтам со средней (22—41 мл-экв.) обменной способностью. По химическому составу пылеватые суглинки являются легкоплавкими.

5. Механическая прочность природных грунтов на сдвиг и компрессию невысокая, при увлажнении суглинков прочностные характеристики снижаются в 2—4 раза.

6. Прогревание (200—300°) суглинков положительно отражается на их свойствах, однако приобретенные качества не прочны и обратимы (при замачивании), поэтому практического значения для пылеватых суглинков не имеют.

7. Термическая обработка суглинков при 400—500° и более высоких температурах дает упрочненный водостойкий материал, свойства которого со временем изменяются незначительно. У обожженных (500° и выше) грунтов исчезают свойства набухания, пластичности, уменьшается пористость, влагоемкость, возрастает морозостойкость, фильтрационная и транспирационная способности.

8. Механическая прочность на одноосное сжатие, в сравнении с естественными грунтами, у термически упрочненных (500—1000°) сухих суглинков возрастает в 18—54 раза, у водонасыщенных в 4—47 раз.

Силы внутреннего трения в 3—5 раз и удельное сцепление в 10—20 раз превосходят аналогичные показатели природных суглинков.

Сжимаемость термоупрочненных суглинков под нагрузкой снижается в 6—10 раз.

9. Для практического использования в работе по термическому упрочнению суглинков предложены формулы расчета термосвай на вертикальные и горизонтальные нагрузки; дана зависимость диаметров термосвай от продолжительности термообработки грунтов; установлена связь между прочностями обожженных грунтов на сжатие, сдвиг и растяжение; предложены методы испытания на сдвиг упрочненных суглинков с геометрически правильной и произвольной формой образцов; определены нормы расхода (на пог. м. скважины) топлива и воздуха.

10. Применение термического метода для стабилизации сплывающих масс грунта на откосах жел. дор. выемок дает положительные результаты. Использование указанного способа технически и экономически целесообразно.

11. Сравнение технико-экономических показателей термического метода с другими физико-химическими и обычными инженерными методами стабилизации глинистых грунтов показывает экономическую эффективность термического метода.

12. Результаты исследования дают возможность рекомендовать термический метод как метод борьбы с деформациями земляного полотна шоссейных и железных дорог Дальнего Востока, а также для повышения несущей способности слабых оснований в промышленном и гражданском строительстве.

13. Проведенные исследования являются одним из этапов научной работы в области термического упрочнения местных грунтов. Целый ряд вопросов, имеющих теоретическое и практическое значение, изучены еще недостаточно полно и требуют своего разрешения в дальнейшей работе по данной проблеме.

Основные положения диссертации доложены автором на Всесоюзном совещании по обобщению опыта проектирования строительства и эксплуатации земляного полотна из пылеватых грунтов в районах Урала, Сибири и Севера (Иркутск, сентябрь, 1962 г.), на техническом совете Дальневосточной ж. д. (Хабаровск, июнь, 1962 г.), на XVIII, XXII, XXIII научно-технических конференциях кафедр ХАБИИЖТа с участием представителей железных дорог и предприятий Дальнего Востока (1959, 1963, 1964 гг.), а также опубликованы в следующих статьях:

1. Тюрин И. М. — Использование термически упрочненных пылеватых суглинков Дальнего Востока для устройства фундаментов. Сб. трудов ХабИИЖТа № 11. Благовещенск, 1957.
2. Тюрин И. М. — Физико-механические свойства термически упрочненных пылеватых суглинков. Материалы XVIII научно-технической конференции ХабИИЖТа. Трансжелдориздат. Хабаровск, 1959.
3. Тюрин И. М. — Термическое упрочнение пылеватых суглинков. Техничко-экономический бюллетень № 4 «Промышленность Хабаровского края». Изд. ЦБТИ. Хабаровск, 1959.
4. Тюрин И. М. — Изменение водных характеристик пылеватых суглинков при нагревании. Труды ХабИИЖТа, вып. 14. Трансжелдориздат. Хабаровск, 1961.
5. Тюрин И. М. — О некоторых вопросах термического упрочнения грунтов. Труды ХабИИЖТа, вып. 14. Трансжелдориздат. Хабаровск, 1961.
6. Тюрин И. М. — Изменение физико-механических свойств пылеватых суглинков при обжиге. Материалы совещания по закреплению и уплотнению грунтов. Киев, 1962.
7. Тюрин И. М. — Некоторые выводы из опыта термического укрепления сплывающего откоса Амурской выемки. Материалы XXII научно-технической конференции ХабИИЖТа. Трансжелдориздат. Хабаровск, 1963.
8. Тюрин И. М. — Результаты наблюдений за термически закрепленным участком сплывающего откоса выемки. Материалы XXIII научно-технической конференции ХабИИЖТа. Хабаровск, 1964.
9. Тюрин И. М. — Опыт термического закрепления сплывающего откоса выемки. Материалы совещания по вопросам изучения оползней и мер борьбы с ними. Изд. Киевского Университета. Киев, 1964.
10. Медник И. Я., Тюрин И. М. — О прочности термически упрочненных глинистых грунтов. Материалы совещания по закреплению и уплотнению грунтов. Тбилиси, 1964.
11. Тюрин И. М. — Обжиг грунтов как метод борьбы с деформациями земляного полотна. Труды совещания в г. Иркутске в 1962 г. Изд. «Транспорт», М., 1964 г.
12. Медник И. Я., Тюрин И. М. — О прочности обожженных глинистых грунтов. Сб. трудов ХабИИЖТа № 17. Хабаровск, 1965.
13. Тюрин И. М. — О результатах термического закрепления участка сплывающего откоса выемки. Сб. трудов ХабИИЖТа № 17. Хабаровск, 1965.