

ОПЫТ ВЫСОКОНАПОРНОЙ ИНЪЕКЦИИ В ПЛАСТИЧНО-МЕРЗЛЫЕ ГРУНТЫ

И. И. САХАРОВ – д-р техн. наук, профессор кафедры геотехники СПбГАСУ, член РОМГТиФ, г. Санкт-Петербург.

А. Е. ЗАХАРОВ – инженер, СПбГАСУ, г. Санкт-Петербург.

Рассматриваются результаты натурального эксперимента по инъекционному укреплению пластично-мерзлой супеси при помощи цементного раствора. Отмечено упрочнение грунта основания в окрестностях внедрения раствора и снижение его деформативности. Результаты проведенных исследований могут использоваться при инъекционном укреплении пластично-мерзлых грунтов для стабилизации потенциально оттаивающих оснований.

Инъекционное укрепление пластично-мерзлых грунтов, проводимое в режиме гидроразрыва, может быть применено для стабилизации потенциально оттаивающих оснований. Кроме того, такое укрепление может рассматриваться как способ подготовки оснований при строительстве на мерзлых грунтах по II принципу. Основная идея такого укрепления и результаты лабораторных опытов были изложены в [1, 2]. Некоторые теплофизические расчеты приведены в [3].

Натурный эксперимент проводился на специальной опытной площадке, расположенной в помещении промышленного холодильника объединения «Вектор» по адресу Санкт-Петербург, ул. Днепропетровская, 61. Холодильник представляет собой 2-этажное здание с монолитным внутренним железобетонным каркасом и перекрытиями. В результате многолетнего промораживания глубина промерзания основания в центре здания достигла 6 м, вследствие чего внутренние колонны здания силами морозного пучения были приподняты на величину до 18 см. Относительная неравномерность подъемов фундаментов средних и крайних колонн каркаса достигла 0,005, что в 5 раз превышало предельную величину по СНиП 2.02.01–83. Этим обстоятельством объяснялось развитие в крайних колоннах трещин с раскрытием до 5 мм.

Грунтовое напластование под зданием следующее: насыпные грунты мощностью около 2 м, при этом подошвы фундаментов колонн каркаса имеют заглубление 1 м; под насыпными грунтами находится слой заторфованной супеси мощностью 2...2,3 м, ниже которого залегают ленточные глины и далее – тугопластичный суглинок; кровля моренных отложений расположена на глубине 7...10 м от поверхности.

Целью натурных испытаний являлось определение:

1. Возможности практического гидроразрыва пластично-мерзлых грунтов с внедрением в них некоторых объемов цементного раствора.

2. Возможности частичного оттаивания мерзлого грунта за счет экзотермии твердеющего раствора.

3. Степени упрочнения инъектированного грунта и его деформативности по отношению к неинъектированному грунту при оттаивании.

С этой целью предполагалось проведение соответствующих опытов:

1 – при гидроразрыве в двух горизонтах 3 скважин с манжетными трубами с замерами поглощения раствора;

2 – при периодическом измерении температур в зонах инъекции;

3 – при стандартных штамповых испытаниях искусственно оттаянных грунтов в скважинах штампом площадью 600 см².

Схема опытной площадки показана на рисунке. Последовательность работ при устройстве площадки и проведении испытаний была такой:

1. Вблизи наружной стены здания, где глубина промерзания составляла около 3 м, в углах квадрата со стороной 0,7 м пробуривались 4 скважины диаметром 93 мм, в которые вставлялись пластмассовые трубы диаметром 43 мм (на рисунке обозначены «МТ»). Пространство между стенками скважины и трубами заливалось обойменным раствором из цемента М400 с противоморозной добавкой ЛИИЖТа.

2. Вокруг скважин с пластмассовыми трубами пробуривались скважины для электродов с расстоянием между ними 0,7 м. Электроды «Э» из арматурной стали диаметром 20 мм и длиной 3,5 м вставлялись в скважины и обсыпались крупным песком.

3. Для последующих штамповых испытаний на площадке были изготовлены 3 буровые анкерные сваи диаметром 151 мм и длиной 4,5 м (на рисунке обозначены «С»). Расстояние между сваями 1–2 и 1–3, равное 3 м, было выбрано исходя из длины типовой стальной балки, служащей упором для домкрата.

4. После устройства манжетных труб из забоев трех МТ (№ 1, 2 и 3) производилась инъекция цементного раствора с добавкой хлористого кальция в пластично-мерзлую супесь. В ходе этих работ измерялись поглощение раствора и температура грунта в четвертой трубе, инъекция через которую не производилась. Температурные измерения разогрева грунта велись в течение 140 ч после окончания инъекции.

5. В местах О1 и О2 (О1 располагалась в центре квадрата, образованного манжетными трубами) пробуривались 2 скважины диаметром 350 мм. Скважины обсаживались трубами 325 мм, а зазор между скважиной и трубами заполнялся обойменным раствором. Глубина скважины О1 – 2,8 м; О2 – 2,1 м.

6. Электроды «Э» через выносной щит подключались к источнику тока. При погружении нижних концов электродов в талый грунт оттаивание при прогреве происходило

снизу вверх. Задача состояла в оттаивании слоя мерзлой супеси от нижних концов электродов до забоя скважин О1 и О2.

7. После завершения оттаивания грунты испытывались штампом в обеих скважинах (О1 и О2).

Холодильник, в котором располагалась опытная площадка, находился в режиме эксплуатации. Описанное выше оборудование площадки и процедура проведения опытов предполагали достаточно длительный срок вывода из оборота части площади холодильной камеры. Однако владельцы холодильника выделяли для эксперимента небольшие промежутки времени, которые чередовались с непредвиденными паузами. Кроме того, доступ в камеру (а следовательно, и к опытной площадке) был возможен только в рабочие дни.

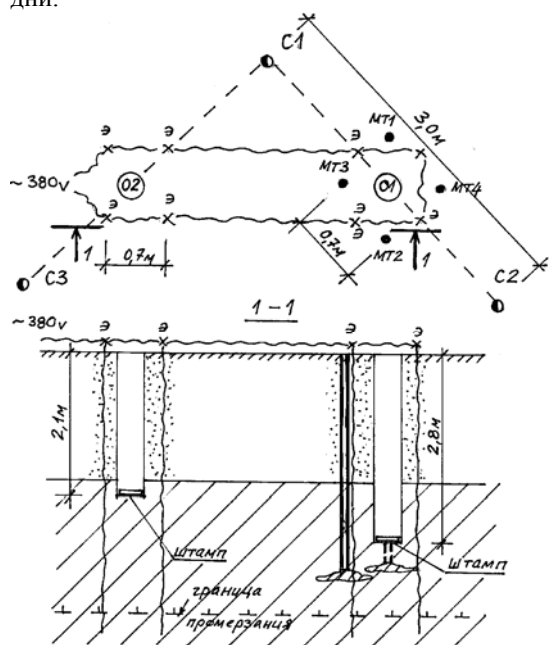


Схема опытной площадки

Наиболее важным обстоятельством была необходимость исключения любого загрязнения площадки и хранящихся рядом с ней продуктов раствором. Вместе с тем известно, что высоконапорная инъекция в малопроницаемые грунты иногда приводит к вырыванию пакеров и фонтанированию раствора. Это вынуждало применять относительно малые инъекционные давления. Перечисленное выше наложило серьезные ограничения на опытные

работы и не позволило добиться полного выполнения поставленных целей и задач.

Устройство и омоноличивание инъекционных трубок «МТ», а также монтаж электродов были выполнены в середине января 2002 г., инъекция через трубки была произведена 22.02.2002 г. Перед инъекцией у забоя каждой трубки с помощью модифицированного электрического транзисторного термометра ТЭТ-2 измерялась температура грунта. До начала инъекции в забой трубки вставлялся одинарный пакер. При завинчивании верхнего ворота пакер разжимался и плотно закреплялся в трубке.

Глубина трубок (низ забоя) по отношению к поверхности пола к началу работ по инъекции была следующей: 1-й – 3,2 м; 2-й – 3,0 м; 3-й – 2,65 м; 4-й – 3,1 м. Температура грунта в забое составляла: для скважины № 1 – ($-0,7^{\circ}\text{C}$); № 2 – ($-1,5^{\circ}\text{C}$); № 3 – ($-1,7^{\circ}\text{C}$); № 4 – ($-1,5^{\circ}\text{C}$).

Инъекция производилась с помощью 3-цилиндрового насоса РН-350, заблокированного с пятиступенчатой коробкой передач. Варьирование скорости вращения и включения в работу от одного до трех цилиндров позволяло изменять подачу раствора в значительных пределах.

Закачиваемый цементный раствор приготавливался на цементе М 400 при В/Ц = 0,7. В качестве добавки использовался хлористый кальций в количестве 1% от массы цемента. Вода подогревалась до температуры 30°C .

При инъекции в скважину № 1 давление варьировалось от 1,5 до 5,5 атм при отдельных пиках до 10 атм. Всего в скважину № 1 было закачано около 150 л раствора (3 мешка цемента, 120 л воды, 1,6 кг хлористого кальция).

В скважине № 2 давление доводилось до 20...28 атм. Затем насос выключался, давление в течение 2...3 мин падало до 10...14 атм и после этого стравливалось до нуля. Закачать в этом режиме раствор в грунт практически не удалось.

В скважине № 3 давление доводилось до 22...35 атм. При этом режиме испытаний давление доводилось до максимума, затем производилась выдержка в течение 2 мин, когда отмечался спад давления до 15...19 атм. Таких циклов было проведено 3. Затем при

отмеченных выше давлениях выдержка производилась в течение 4...5 мин (2 цикла). Общее время опрессовки раствором забоя скважины № 3 составило 16 мин. В результате в грунт удалось закачать всего несколько литров раствора.

При внедрении в мерзлый массив цементного раствора в окрестностях цементной линзы должен был наблюдаться разогрев грунта. В первые моменты он обусловлен теплоотдачей подогретого раствора, а в последующем – выделением тепла экзотермии при образовании цементного камня. Разогрев грунта устанавливался по показаниям трех термометров сопротивлений ТЭТ-2, находящихся в скважине № 4, смонтированных по вертикали с шагом 10 см.

Измерения температур в скважине № 4 по организационным причинам были начаты только 24 февраля 2002 г., спустя 37 часов после инъекции. В начале измерений температура в забое скважины № 4 составляла $+3,2^{\circ}\text{C}$ (до инъекции она была $-1,5^{\circ}\text{C}$). При последующих измерениях температура грунта медленно понижалась и спустя 2 сут достигла $+0,6^{\circ}\text{C}$. После этого по организационным причинам температурные измерения были прерваны на 2 сут. Спустя 140 ч после инъекции температура забоя скважины № 4 опустилась до $-0,5^{\circ}\text{C}$. После фиксации отрицательных значений температур измерения были закончены.

В апреле 2002 г. было произведено электрооттаивание грунта в забоях скважин большого диаметра О1 и О2. С целью предварительной оценки деформаций оттаивания до начала подключения электродов к сети по центру забоя скважин О1 и О2 в мерзлый грунт на глубину 20 см забивались Г-образные штыри, соединяемые через прогибомеры с реперной системой, смонтированной над скважинами.

Оттаивание зон испытаний штампов велось в течение 12 ч. По завершении оттаивания прогибомеры зафиксировали осадки в обеих скважинах. При пересчете на одинаковую мощность оттаянного грунта относительные деформации оттаивания для инъектированного грунта были примерно в 3 раза меньше, чем грунта природного сложения.

Испытание грунтов штампами непосредственно после оттаивания было выполнено ПКТИ. Испытания проводились в соответствии с требованиями ГОСТ 20276–85. Вертикальное давление на стальной жесткий круглый штамп площадью 598 см^2 (диаметр 276 мм), установленный горизонтально на грунт забоя скважины, создавалось гидравлическим домкратом грузоподъемностью 25 т. Передача нагрузки осуществлялась через обсадную трубу.

Давление на домкрате создавалось при помощи маслонасосной станции ГН-400 и фиксировалось по манометру с ценой деления 10 атм. Нагружение штампов при испытании производилось ступенями, при этом ступень давления на заинъектированный грунт составляла $0,625 \text{ кг/см}^2$, а на незакрепленный – $0,313 \text{ кг/см}^2$.

Полученные значения модулей деформации составили: для инъектированного грунта $E = 21 \text{ кг/см}^2$ (в интервале давлений $0,625 \dots 2,500 \text{ кг/см}^2$), для незакрепленного грунта $E = 12,5 \text{ кг/см}^2$ (в интервале давлений $0,625 - 1,250 \text{ кг/см}^2$). Предельное давление на штамп для незакрепленного грунта составило $1,875 \text{ кг/см}^2$, для инъектированного грунта оно превысило $2,5 \text{ кг/см}^2$ и в ходе испытаний достигнуто не было.

ВЫВОДЫ

В ходе проведенных исследований удалось произвести инъекцию в пластично-мерзлую супесь, имеющую температуру около $-0,7^\circ\text{C}$.

Осуществить гидроразрыв грунта при более низких температурах ($-1,5 \dots -1,7^\circ\text{C}$) не удалось даже при пиковых значениях давлений в 35 атм. По-видимому, гидроразрыв в массиве грунтов при таких температурах может быть осуществим при давлениях не менее 50 атм.

Разогрев мерзлого грунта с переходом температур в область положительных значений вблизи линзы внедренного раствора отчетливо фиксируется в течение нескольких суток.

Грунт в окрестностях внедрения цементного раствора упрочняется, его деформативность снижается. В ходе эксперимента отмечается повышение модуля деформации грунта при расстоянии от цементной линзы на $30 \dots 40 \text{ см}$ примерно в два раза.

Список литературы

1. *Сахаров И. И., Захаров А. Е.* Перспективы методов усиления оснований архитектурных памятников севера и Сибири // Реконструкция городов и геотехническое строительство: Интернет-журнал. 2001. № 4.
2. *Захаров А. Е.* Исследование температурных полей в мерзлых грунтах, контактирующих с твердеющими растворными прослойками // Сб. тр. 59-й науч. конф. / СПбГАСУ. СПб., 2001.
3. *Усиление* замороженных оснований зданий холодильников / Сахаров И. И., Шашкин К. Г., Васенин В. А., Захаров А. Е., Парамонов В. Н., Кудрявцев С. А. // Тр. междунар. науч.-практ. конф. Пенза, 2002.