

ЖУРНАЛ ТОННЕЛЬНОЙ АССОЦИАЦИИ РОССИИ



ISSN 1726-6165

Метро *и* тоннели

№ 4

сентябрь 2005



**К 1000-летию КАЗАНИ
ОТКРЫЛСЯ 7-й МЕТРОПОЛИТЕН СТРАНЫ**

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ И ИНФОРМАЦИОННОЕ ИЗДАНИЕ



КОНДИЦИОНИРОВАНИЕ ГРУНТА. ПЕРЕДОВАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ДЛЯ ПРОХОДКИ ТОННЕЛЕЙ ЩИТАМИ С ГРУНТОВЫМ ПРИГРУЗОМ ЗАБОЯ

Ларс Лангмаак, менеджер проектов ТПМК, Degussa, Underground Construction Group, Цюрих, Швейцария



Способ проходки тоннелей с использованием щитов с грунтовым пригрузом забоя хорошо известен, тем не менее, есть процессы, которые требуют более глубокого изучения. В частности, это касается различных добавок для кондиционирования грунта, их свойств и возможности применения на стройплощадке. Необходимо держать под контролем все ключевые факторы, чтобы добиваться как требуемых результатов кондиционирования, так и высоких темпов проходки.

Устойчивость забоя

Наиболее важная задача, и это не только при использовании технологии грунтового пригруза забоя, — сбалансировать давление грунта на роторе встречным давлением в рабочей камере. В статье рассказывается, в том числе и о том, как рассчитать необходимое давление в зависимости от реальных свойств грунта.

Устойчивость забоя в гранулированных, несвязных или слабо связных грунтах

В несвязных или слабо связных грунтах минимальное необходимое давление для обеспечения устойчивости забоя может быть определено с использованием трехмерной модели предельного равновесия (рис. 1).

Устойчивость забоя в связных грунтах

При оценке устойчивости забоя в связных грунтах используется так называемый фактор устойчивости.

Фактор устойчивости — величина относительная к величине обрушения забоя в состоянии предельного равновесия. Впервые это было определено Бромсом и Бенимарком (1967 г.) как отношение давления выходящих грунтов, уменьшенного на величину давления, поддерживающего забой на уровне оси тоннеля, и сопротивления сдвигу водонасыщенных грунтов.

Общепринятые показатели фактора устойчивости:

- $N < 2$ — незначительные подвижки грунта;
- $2 < N < 4$ — щит обычно содержит подвижки грунта;

- $4 < N < 6$ — увеличение подвижек грунта;
- $N > 6$ — забой может быть неустойчивым, глины могут выдвинуться в сторону забоя.

Почему применяется кондиционирование грунта при использовании технологии грунтового пригруза забоя

Чтобы сформировать необходимое давление на забой, грунт должен быть непроницаемым для воздуха. Три основных технологии проходки были разработаны, исходя из вышеназванного принципиального требования.

1. Щитовая проходка под сжатием воздуха

Эта технология применима в тех случаях, когда грунт сам по себе почти непроницаем для воздуха. Такое встречается редко.

2. Щитовая проходка с бентонитовым пригрузом забоя (Shutter TBM)

Рабочая камера заполняется бентонитовой суспензией, большой воздушный пузырь в верхней части рабочей камеры контролирует давление на забой. Эта технология может быть применена в широком спектре грунтов. Но она имеет также и недостатки, прежде всего, это необходимость масштабного и дорогого сепарационного хозяйства на поверхности.

3. Щитовая проходка с грунтовым пригрузом забоя (EPB TBM)

Рабочая камера заполнена разрабатываемым грунтом, вращающийся ротор ответственен за создание однородной и непроницаемой грунтовой пасты. Чтобы получить такую грунтовую пасту, в большинстве случаев необходимо использовать специальные добавки для кондиционирования грунта, тип их зависит от реальных свойств грунта. Иногда достаточно только воды, чаще необходима пена для формирования пастообразной консистенции и для введения определенного количества воздуха с целью обеспечения необходимого давления на забой. Для крупнозернистых грунтов, в основном, необходимы полимеры, для плотных глин могут быть полезными добавки, препятствующие налипанию и запыловке.

На рис. 2 показана общая картина грунтовых условий для кондиционирования грунта.

При использовании технологии проходки с грунтовым пригрузом забоя нет необходимости ни в бентоните, ни в специальном сепарационном хозяйстве, и выдаваемый на поверхность разработанный грунт близок к естественному. При использовании таких добавок, как пена или полимеры, имеются биodeградирующие версии, 95 % которых разрушаются через 28 дней. Грунтовый пригруз забоя может быть весьма привлекательной альтернативой бентонитовому. Важную роль играет правильный выбор добавок для кондиционирования грунта. Этот выбор должен быть сделан специалистом после лабораторных исследований. Лучше, если грунт будет взят непосредственно со стройплощадки.

Добавки для кондиционирования грунта

Выбор типа пены и полимеров зависит, в первую очередь, от свойств грунта и гидрогеологических условий строительства, а также от особенностей проходческого щита (открытый или закрытый тип, точная инъекция, тип пеногенератора).

Основные кондиционеры грунта – пены и полимеры. Есть также продукты, препятствующие налипанию грунта и снижающие износ режущего инструмента.

Пена

Главное требование к пене, как к кондиционирующей добавке, – обеспечить пастообразную консистенцию грунта, способствовать созданию и поддержанию необходимого давления в рабочей камере щита и предотвратить резким колебанием давления. Маленькие пузырьки, создаваемые пеной, в пастообразном

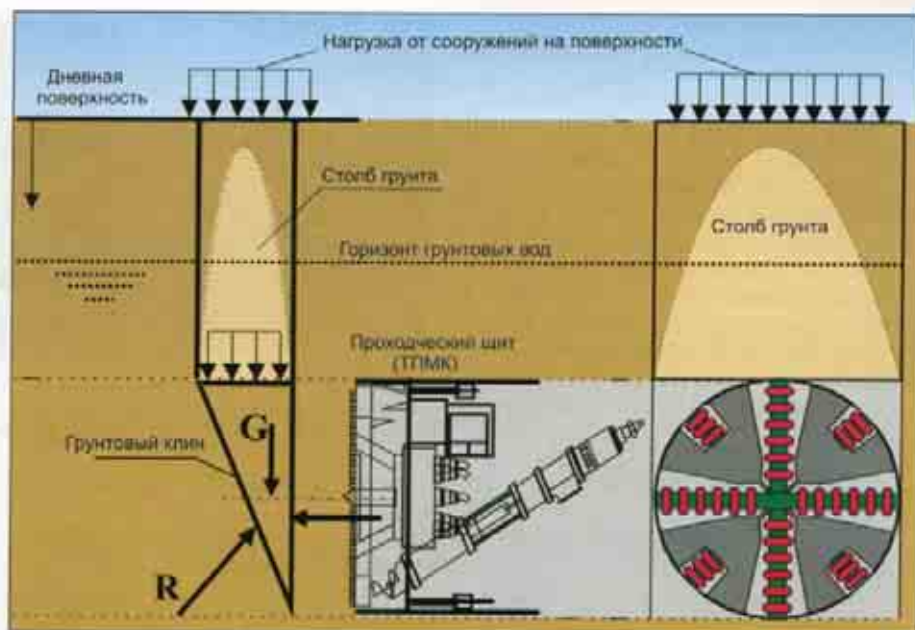


Рис. 1. Трехмерная модель предельного равновесия для несвязных грунтов

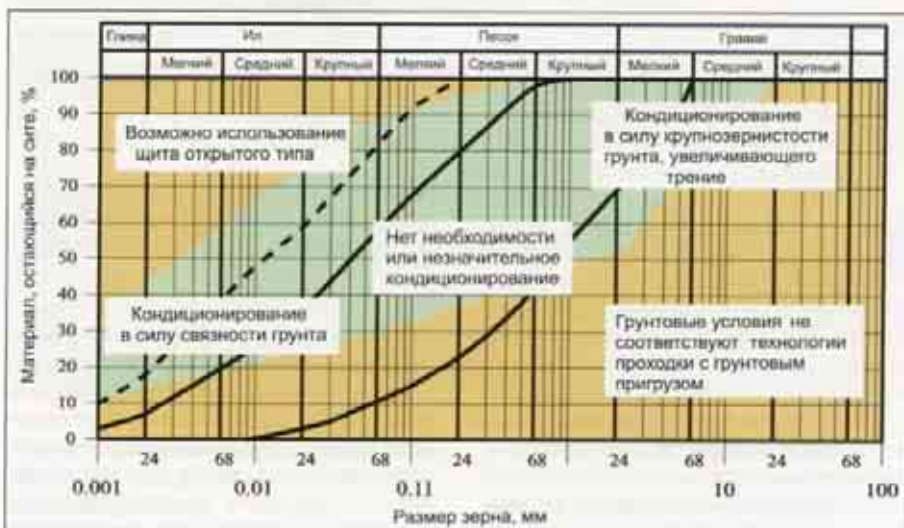


Рис. 2. Общая схема кондиционирования грунтов при щитовой проходке с грунтовым пригрузом

грунте обеспечивают такой же эффект, как и большой воздушный пузырь в технологии проходки с бентонитовым пригрузом. Пена, как правило, обеспечивает и удовлетворительные реологические свойства грунта. Снижение сопротивления при вращении ротора, снижение износа режущего инструмента – важный дополнительный эффект при ее использовании.

Пена может быть создана турбулентным смешиванием поверхностно-активных веществ (ПАВ) и воздуха (рис. 3).

Главными результатами использования ПАВ являются:

- разжижение грунта, как следствие снижения поверхностного натяжения. Частицы грунта более удерживаются связанной водой
- действует эффект электростатического отталкивания, который может отделить частицы, связанные электростатическими силами.

Эффект может различаться в зависимости от типа ПАВ.

ПАВ – это комбинация гидрофобной цепочки и гидрофильной головки. Оба параметра могут варьироваться: возможны раз-

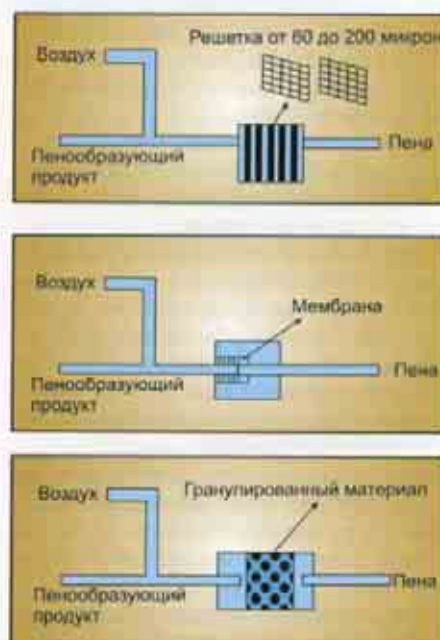


Рис. 3. Различные типы пеногенераторов

личные конструкции цепочки (длина, пространственная структура) и различные показатели головки (лимонный, катионный и т. д.). Эти различия химической структуры приводят к различиям в свойствах.

Каждый тип грунта, от плотных глин до гравелистых песков, требует несколько отличающейся пены, чтобы добиться максимальной эффективности. Оптимальный для конкретных грунтовых условий тип ПАВ должен быть подобран в лаборатории. ПАВ в большинстве случаев используются в виде пены, но могут быть применены также и в виде жидкости.

Пена должна использоваться в конкретных условиях, которые характеризуются особыми параметрами. При использовании проходческих щитов наиболее важны три параметра:

- концентрация ПАВ-агентов в пенообразующем продукте;
- соотношение пенообразующего продукта и воздуха;
- соотношение пены и грунта.

Полимеры

В дополнение к тому, что полимеры оказывают стабилизирующий эффект на пену, по своим функциональным особенностям они бывают двух основных типов:

- связывающие воду полимеры;
- полимеры, изменяющие структуру грунта, что необходимо для несвязных грунтов для предупреждения сегрегации.

В основе некоторых полимеров – углеводородные цепочки, и они производятся с использованием бактериальной закваски. Эти полимеры растворимы в воде и после использования биологически разлагаются. Любой тип используемых полимеров безопасен для пеногенератора и, следовательно, они могут смешиваться с пенообразующими продуктами и проходить через пеногенератор.

Полимеры обеспечивают более стабильное поддерживающее давление в рабочей камере, как в момент проходки, так и при коротких остановках.

Использование полимеров может обеспечить следующий эффект:

- увеличить стабильность пены;
- прицать грунт большую пластичность;
- предупредить сегрегацию;
- предупредить излупание;
- улучшить условия проходки в сильно пористых грунтах.

Предпочтительнее использование полимеров в жидком виде, чтобы избежать проблем с дозированием и не устанавливать дополнительное оборудование для их растворения.

Распускающие глину агенты

Чтобы выполнить указанную работу, диспергирующие грунт молекулы должны располагаться на поверхности частиц грунта и разделить их. Эту работу могут выполнять как ПАВ, так и диспергенты, последние – более эффективны. Распускающие грунт агенты используются, главным образом, в глинах для усиления дис-



Гравелистый песок



Гравелистый песок с пеной

Рис. 4. Изменение свойства грунта, иллюстрируемое изменением осадки конуса

пергирующих свойств пены, но могут применяться и без пены.

Антиабразивные добавки

Антиабразивные добавки разработаны для сильно абразивных грунтов и скальных пород с целью защиты ротора, режущего инструмента и шнекового конвейера. Эти продукты могут вводиться за ротор, в рабочую камеру или в шнековый конвейер. Добавки могут быть инъецированы в концентрированную пену или разбавлены водой.

Результаты исследований кондиционирующих добавок в лаборатории и на строительных площадках

Пена

Лабораторные тесты на осадку конуса для Измирской стройплощадки (Турция)

Для определения реологии грунта, что крайне важно при использовании технологии проходки с грунтовым пригрузом забоя, очень важны тесты по определению осадки конуса. Оборудование для тестирования используется то же, что и при тестировании обычного бетона.

Результаты тестов сильно различаются и являются показателями реологии грунта. Рис. 4 показывает влияние пены на гравелистые пески и иллюстрирует изменения в поведении грунта и важность тестов на осадку конуса.

Пластичность консистенции грунта может быть получена даже при низком содержании воды. Если не добавлять пену, грунт будет слишком жестким, что нежелательно для ТМПК. Частицы самого тонкого материала (илыстые и глинистые) изменяют реологические свойства грунта, и нередко в этом случае необходимости в добавке полимеров нет, достаточно пены.

Анализ результатов Измирского проекта

Измир с населением около 3,5 млн человек – третий по крупнейшим городам Турции. Из общей длины 11,3 км новой трассы – 1,375 км приходится на щитовую проходку с грунтовым пригрузом, 1,7 км – на NATM, 1,1 км тоннеля построено открытым способом, остальное – открытые участки и эстакады.

Для проходки тоннеля был использован щит с грунтовым пригрузом фирмы «Хернштейн» диаметром 6,52 м. Проходка была

начата в августе 1997 г. и успешно завершена в декабре 1998 г. без происшествий и сверхнормативных осадок поверхности.

Геологические условия строительства

На первом участке трассы между станциями Басмане и Чанкайя проходка велась в основном в несвязных грунтах, на втором участке между станциями Чанкайя и Конак – в связных и водонасыщенных грунтах. Исследования грунта проводились как на стройплощадке, так и в лаборатории.

Проходку тоннеля удалось выполнить в трех различных группах грунтов: гравелистых и илстых песках, глинистых и песчаных илах и в глинах.

Проходка тоннеля в илстых грунтах с прослойками песка на участке первых 250 колец велась параллельно морскому побережью на расстоянии 150 м. Грунты были слабыми, водонасыщенными, содержащие органического материала составляло ориентировочно 20 %. Проходка щитом с грунтовым пригрузом забоя велась без осложнений; необходимость в кондиционировании грунта требовалась лишь на отдельных участках. Позднее были повреждены отдельные узлы машины, и появилась необходимость «облегчить» проходку для ТМПК, что, в данном случае, означало необходимость кондиционирования грунта для снижения сопротивления при работе ротора.

Результаты лабораторных исследований при использовании полимеров

Лабораторные исследования могут быть необходимы, чтобы подобрать верные продукты и технологии, позволяющие снизить проницаемость грунта. Ниже приведены результаты исследований с пористыми грунтами с проекта BPNI Lyon (Франция). Грунты эти водонепроницаемы и давление воды составляло 0,4 бар (рис. 5). Добавление бентонита уменьшало проницаемость грунта, поскольку тонкие частицы закрывали имевшиеся в грунте поры. При использовании полимера получали аналогичный результат в глинистых илах. Цепочки полимера изменяли структуру грунта, слегка склеивая мелкие частицы.

Пример проекта Авилес (Испания)

На проекте Авилес проходка выполнялась щитом с грунтовым пригрузом фирмы «Локат» диаметром 4 м. После проходки участка

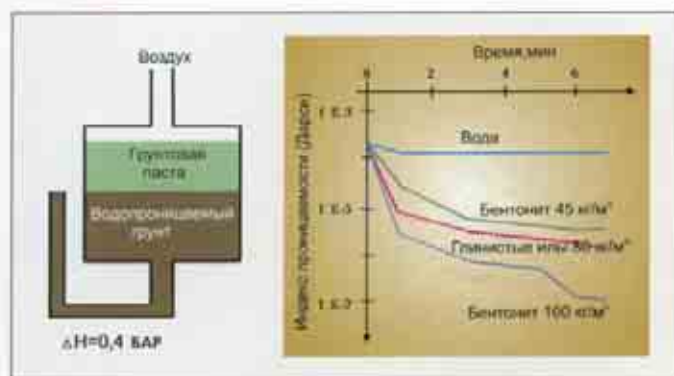


Рис. 5. Динамический показатель грунтового теста

плотных илстых глин на длине около 1000 м проходки велась в чистых песках с гравием, давление грунтовых вод в которых составляло 3,5 бар. Лабораторные исследования включали тесты на проницаемость и сегрегацию с использованием грунтов с площадки Авилес и полимера SLP 2.

На рис. 6 показано, какие проблемы возникают в несвязных грунтах, смешанных с водой. Происходит почти полная сегрегация, не позволяющая работать. Очень стабильная пена улучшает результаты, но все равно 20 % сегрегация происходит через 15 мин, что является слишком большим показателем для нормальной работы ТПМК. Сегрегацию, как и однородность грунта, удалось контролировать только после добавления биополимера.

Вспенивающие агенты обеспечивают разжижающий эффект (большую глубину проникновения конуса), и зависит это от концентрации ПАВ. Связывающие воду полимеры, как SLP P1 в тех же грунтах и при том же содержании воды, обеспечивают меньшую глубину проникновения конуса за счет эффекта связывания воды.

Результаты использования кондиционирующих добавок для проекта Авилес

На объекте используют очень стабильную пену, вводимую перед ротором щита, к которой добавляется 2–4 % биополимера для получения стабильного и пластичного грунтового теста. Имея такое тесто, щит способен обеспечить необходимое давление в камере и избежать попадания воды внутрь. По соображениям безопасности на стройплощадке решили инъектировать связывающий воду полимер как в рабочую камеру, так и в шнековый конвейер.

Лабораторные исследования диспергации глины и сцепления

Эффективность диспергации глины путем введения добавок может быть определена конусом-пенетрометром. Глубина проникновения характеризует пластичность грунта. Имея в виду глины, эффективные диспергирующие добавки приводят к большой глубине проникновения.

Этот тест не подходит для тестирования сцепления. Для определения сцепления используется тест скольжения, позволяющий определить изменение сцепления при введении добавок.



Рис. 6. Тесты на сегрегацию

Таблица

Результаты измерений износа режущего инструмента и пластин конвейера при проходке тоннеля BPNL Lyon

Недели	1	2	3
Способ кондиционирования	17 % воды	17 % воды + 0,1 % АБР-1	17 % воды
Скорость щитовой проходки, м/неделю	72	68	94
Продолжительность одного цикла, мин	85	82	79
Общий износ дисков (шарошек), мм	15	9,8	12,2
Общий износ пластин, г	90	15	100
Результаты по дискам (шарошкам)			
Износ, мм/м проходки тоннеля	0,21	0,14	0,13
Скорость щитовой проходки, мм/мин	23,5	24,4	25,3
Усилия резания, kW	957	1497	1226
Отношение, %	100	42,7	45,2
Результаты по пластинам			
Износ, г/м проходки тоннеля	1,25	0,22	1,06
Вращение шнекового конвейера, об/м проходки тоннеля	425	164	183
Отношение, %	100	46	183

Исследования антиабразивных свойств добавок и фактические результаты при проходке

Следующие лабораторные исследования были выполнены с сильно абразивными гнейсами с Лионской стройплощадки (Франция). Вводились антиабразивные добавки различной концентрации, и измерялась потеря массы вращающегося латунного диска. Износ инструмента снижается при использовании водной суспензии. Количество воды существенно влияет на интенсивность износа.

Было определено влияние добавки Meuco Fix ABR 1 на износ режущего инструмента. Исследования показали, что ее введение снизило износ инструмента до 50 % по сравнению с тем случаем, когда вводилась только вода.

Интересен побочный результат исследований: увеличение объема мелких частиц (до 4 мм диаметром) увеличивает износ инструмента.

Реализация проекта Лион (Франция) началась в 1995 г. и была завершена в 1997 г. при этом использовался щит с грунтовым пригрузом фирмы «NFM» диаметром 11 м – самый большой в мире для щитов такого типа.

Результаты проходки тоннеля BPNL Lyon (Франция)

Геологические условия по трассе тоннеля были следующие:

- 1250 м – кристаллические породы;
- 450 м – чередование аллювиальных отложений и кристаллических пород;
- 1552 м – осадочные породы.

Антиабразивные добавки тестировались в трещиноватых гнейсах.

Как видно из табл., период испытаний составлял три недели. В течение первой – использовалась только вода, в течение второй – 0,5-% водный раствор АБР-1, в течение третьей недели – опять использовалась только вода. Полученные результаты не столь просто сравнивать в силу изменившихся геологических условий и режима работы ТПМК. Но, рассматривая в совокупности все параметры работы машины: скорость проходки, величину давления на забой и др., которые зависят от геологических условий, результаты испытаний показывают многократное снижение износа пластин шнекового конвейера. Что касается дисковых шарошек, то уменьшение износа их менее значительно, но также имеет место. Стоит обратить внимание на большую разницу в давлении на забой.

Автор выражает признательность доктору М. Сари, Родия, Париж и П. Элленбергеру, MBT International, Цюрих.

