

Хун Кайжун

# Ключевые технологии и приемы использования щитовых проходческих комплексов при сооружении тоннелей



Кайжун Хун

**Ключевые технологии и приемы  
использования щитовых  
проходческих комплексов  
при сооружении туннелей**

«Автор»

2024

**Хун К.**

Ключевые технологии и приемы использования щитовых проходческих комплексов при сооружении туннелей / К. Хун — «Автор», 2024

Щитовые проходки в настоящее время широко применяются в строительстве рельсового транспорта городов, подземных комплексов галерей трубопроводов, при строительстве подземных пространств железнодорожных и шоссейных туннелей, водоотводных туннелей и других крупногабаритных сооружений. Данная книга создана авторитетными специалистами в отрасли проходческих щитов и является комплексной энциклопедией о щитовой проходке. Она содержит подробную информацию как по истории создания, так и новейшие данные по изготовлению и использованию проходческих щитов. При этом книга снабжена богатым иллюстративным материалом. Предназначена для специалистов и студентов, занимающихся проектированием, строительством, для преподавателей инженерного менеджмента в области проходческих щитов.

© Хун К., 2024

© Автор, 2024

## Содержание

|                                                                         |     |
|-------------------------------------------------------------------------|-----|
| ПРЕДИСЛОВИЕ                                                             | 5   |
| ПРЕДИСЛОВИЕ                                                             | 7   |
| ПЕРВЫЙ РАЗДЕЛ. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ                                           | 9   |
| ГЛАВА 1. ПРОХОДЧЕСКИЕ ЩИТЫ И ИХ РАЗВИТИЕ В КИТАЕ                        | 10  |
| ГЛАВА 2. МЕТОД ЩИТОВОЙ ПРОХОДКИ И ЩИТОВЫЕ ТУННЕЛИ                       | 66  |
| ГЛАВА 3. КЛЮЧЕВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ ПО МЕТОДУ ЩИТОВОЙ ПРОХОДКИ | 105 |
| ГЛАВА 4. ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЩИТОВОЙ ОБДЕЛКИ ТУННЕЛЯ                         | 172 |
| ГЛАВА 5. ПЛАТФОРМА БОЛЬШИХ ДАННЫХ ЩИТОВОЙ ПРОХОДКИ                      | 214 |
| ВТОРОЙ РАЗДЕЛ. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ                                           | 221 |
| ГЛАВА 6. СИСТЕМА ПРОХОДЧЕСКИХ ЩИТОВ И КЛЮЧЕВЫЕ КОМПОНЕНТЫ               | 222 |
| Конец ознакомительного фрагмента.                                       | 247 |

# **Кайжун Хун**

## **Ключевые технологии и приемы использования щитовых проходческих комплексов при сооружении туннелей**

### **ПРЕДИСЛОВИЕ**

Щитовые проходки в настоящее время являются супергигантскими специальными инженерными вооружениями, которые широко применяются в строительстве рельсового транспорта в городах, подземных комплексах галерей трубопроводов и при строительстве таких подземных пространств, как железнодорожные и шоссейные туннели, водоотводные туннели, военные оборонительные крупногабаритные сооружения.

На протяжении долгого времени рынок проходческих щитов в Китае был монополизирован иностранными компаниями. Только после десятого и одиннадцатого пятилетних планов в качестве и технологии строительства проходческих щитов был достигнут очевидный прогресса. Доля отечественных щитов на рынке превысила 85%. Используя новые идеи государственной инициативы «Один пояс – один путь», китайские специалисты в отрасли щитов продолжают внедрять инновации и продвигать национальную промышленность высокотехнологичного оборудования в строительстве крупномасштабных туннелей, непрерывно укрепляя имидж «сделано в Китае».

Эта книга появилась в эпоху великого строительства, бурного развития и больших возможностей современного Китая. Данное пособие является инновационным, всеобъемлющим, интегрирующим китайские и европейские достижения. Помимо полного представления отечественных и зарубежных технологических особенностей в развитии щитовых проходок в этой книге научно представлены обобщения и выводы по туннельному строительству в Китае. В том числе довольно большой объем в книге занимают технические результаты, достигнутые специалистами в области проходческих щитов за последние годы.

Во время выхода книги был опубликован профессиональный норматив «Развитие производства проходческих машин /ТБМ/ до 2025 года и на тринадцатую пятилетку». Поэтому в книгу включены новейшие данные по изготовлению проходческого щита, которые согласуются с поставленными задачами. Я уверен, что эта книга внесет вклад в стандартизацию производства проходческих щитов, приведет к росту потребления изделия и будет способствовать продолжительному развитию индустрии изготовления щитов.

Данная книга создана на основе труда многочисленных авторитетных специалистов в отрасли проходческих щитов, является комплексной энциклопедией о щитовой проходке, которая соответствует требованиям по строительству социализма с китайской спецификой и поможет найти ответы на сложные вопросы проектирования и строительства проходческих щитов в Китае. Энциклопедия содержит прекрасные тексты и иллюстрации, а информация представлена подробно и точно. Я искренне рекомендую данную книгу специалистам и студентам, которые занимаются проектированием, строительством, преподаванием и инженерным менеджментом в области проходческих щитов.

«Предшественники сажают деревья, преемники пользуются их тенью» – гласит народная мудрость. Надеюсь, что эта энциклопедия сыграет важную роль в деле проектирования и строительства проходческих щитов.



Член китайской академии инженерных наук Ван Мэншу  
2017 год, декабрь

## ПРЕДИСЛОВИЕ

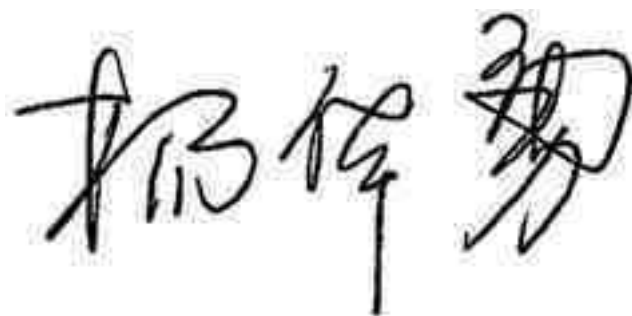
Вследствие бурного развития в Китае транспорта и водоотводных построек, протяженность железных дорог достигла 121 000 км, среди которых протяженность высокоскоростных железных дорог составляет 19 000 км. По предварительным подсчетам к 2020 году общая протяженность железных дорог в Китае достигнет 150 000 км. Общий масштаб городского рельсового транспорта превысит 4000 км, объем строительства скоростной автотрассы составит около 85 000 км, строительство гидротехнических и гидроэнергетических туннелей составит около 1000 км. Строительство по методу щитовой проходки станет основным методом строительства из-за его безопасности, экологичности и скорости строительства. В отличие от других методов ключевым пунктом в успехе строительства проходческого щита является рациональное использование щита и геологическая адаптация с учетом сложных условий границы вмещающих пород.

Поэтому особенно важно глубоко понимать структурные характеристики, принципы работы и взаимодействия строительной техники щитового оборудования.

«Ключевые технологии в проходческих щитах» – первая академическая монография, изданная в Китае, по строительству и проектированию проходческих щитов в сложных пластах, включающая в себя как проектирование оборудования, так и ключевые методы строительства. Автор предложил теорию выбора модели проходческого щита по трем углам, создал теоретическую систему проектирования в сложных пластах «три принципа и четыре качества» (избегает геологических рисков с помощью геологической разведки; избегает риска оборудования через планирование и адаптацию потенциала щитовых проходок; избегает антропогенных рисков через специальный контроль и управление; проектирование щита должно соответствовать принципам земляных работ, дренажа, устойчивости и долговечности). Также автор создал метод строительства щитовых проходок для подводных туннелей, основанный на принципе «снижать давление, ограничивать выбросы», и получил национальный патент на изобретение; впервые применил метод сварки и резки под давлением и получил провинциальный и государственный патент на изобретение; разработал технологию быстрой проверки и замены режущих инструментов в условиях сверхвысокого давления, за что тоже получил государственный патент на изобретение.

Редакторы данного пособия являются опытными техническими специалистами, занимающимися проектированием и изготовлением оборудования. Они накопили богатый опыт и множество примеров строительства, тесно связанных теоретической частью. Инженерно-технические задачи в сочетании с большим количеством примеров строительства являются отправной точкой при возникновении технических вопросов. Инженерные задачи относятся к техническим задачам, которые решаются посредством синтеза теоретического анализа и инженерной практики. Пособие всесторонне знакомит читателя с историей развития технологий проходческих щитов в стране и за рубежом; включает в себя проектирование проходческих щитов, технологии строительства и примеры строительства. Пособие предназначено как для практической работы, так и для углубления знаний в сфере проектирования и строительства проходческих щитов. При этом оно имеет глубоко научный характер.

Что вселяет надежду, что издание данного пособия будет способствовать дальнейшему развитию технологий проходческих щитов в Китае, а также сыграет свою роль в деле улучшения строительства туннелей проходческого щита.



Член китайской академии  
инженерных наук  
Ян Хуаюн  
2017 год, декабрь

## **ПЕРВЫЙ РАЗДЕЛ. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ**

В первых пяти главах данной книги излагается теория по строительству проходческих щитов, а также их история развития в Китае, методы щитовых проходок, туннели щитовых проходок, ключевые техники при строительстве по методу щитовой проходки, проектирование туннельной обделки проходческого щита, создание больших данных проходческих щитов. В первой главе излагается общее понятие проходческих щитов, их классификации; представлены основные инновации в широкомасштабном инженерном строительстве. А также в ней предложены и определены три стадии развития щитовых технологий в Китае. Во второй главе представлены особенности метода щитовой проходки, область применения, текущая ситуация развития, тенденции в развитии, классические технологические приемы, риски и профилактика в строительных работах, на которых основана теоретическая система профилактики и контроля «три начала и четыре умения».

Третья глава знакомит читателя с геологоразведочными работами, выбором модели проходческого щита, технологией контроля осадки, а также представляет теоретический способ выбора модели проходческого щита по трем углам. В четвертой главе представлен проект туннельной обделки. В пятой главе содержится создание больших данных проходческого щита. Настоящий раздел на основе практики строительства по методу щитовой проходки упорядочил кластер основных результатов в разнообразных сложных стратиграфических условиях, создал техническую систему строительства по методу щитовой проходки, имеет важное значение руководства и справки при проектировании по выбору модели и строительстве по методу щитовой проходки.

**Глава 1.** Проходческие щиты и их развитие в Китае

**Глава 2.** Метод щитовой проходки и щитовые туннели

**Глава 3.** Ключевые технологии в строительстве по методу щитовой проходки

**Глава 4.** Проектирование обделки щитового туннеля

**Глава 5.** Создание больших данных для проходческого щита

# ГЛАВА 1. ПРОХОДЧЕСКИЕ ЩИТЫ И ИХ РАЗВИТИЕ В КИТАЕ

## 1.1. ОБЩИЕ ПОНЯТИЯ

### 1.1.1. Определение щитовой проходки

Щитовая проходка (Shield Machine) – оборудование для строительства туннелей, используемое для закрытой проходки туннеля, имеющее металлический корпус. Корпус внутри оснащен целостным механизмом и вспомогательным оборудованием. Под прикрытием корпуса проходческого щита осуществляется выемка грунта, выгрузка грунтового шлака, продвижение целостного механизма и установка сегментов и другие работы, тем самым однократно формируя туннель, как показано на *рис. 1-1*.





*Рис. 1-1. Внешний вид проходческого щита*

Проходческий щит является специализированным механизмом строительства туннелей, используется для осуществления индустриальной работы по быстрому, безопасному и экологическому строительству. Современный проходческий щит соединяет в себе механические, электрические, гидравлические, сенсорные и информационные технологии, а также выполняет функции выемки и разрезки грунта, транспортировки грунтового шлака, собирания туннельной обделки, измерения и исправления неточностей и другие функции. Проходческие щиты уже широко используются при прокладке туннелей в метро, на железных дорогах, автомагистралях, в городском строительстве, гидроэнергетике и в других сферах.

Принцип работы проходческого щита заключается в том, что элемент стальной конструкции продвигается вдоль оси туннеля, продвигая за собой землю. Корпус этого элемента стальной конструкции называется корпусом проходческого щита. Он выполняет функции временной опоры для вырытого участка туннеля, также может выдержать давление почвенного слоя, подземных вод, изолирует подземные воды от внутренней части корпуса. Под прикрытием корпуса проходческого щита осуществляется прокладывание туннелей, отвал грунта, футеровка и другие операции.

### **1.1.2. Различие между щитовой проходкой и ТБМ (тоннельной бурильной машиной)**

Проходческие щиты и проходческие машины также называют туннелепроходческими щитами. У английского названия «Tunnel Boring Machine» есть аббревиатура ТБМ. В странах Европы и США ТБМ относится к проходческим комбайнам в мягких грунтах и горных слоях. В Японии и Китае проходческие щиты обычно подразумевают проходческие комбайны в мягких слоях почвы, способные укреплять структуру пласта при рытье мягких слоев почвы, тогда как ТБМ обычно относят к проходческим комбайнам, предназначенным для работы с горными породами (рис. 1-2). Такие различия и неопределенность классификации в инженерных кругах,

специализирующихся на прокладке туннелей, часто порождают недопонимание и путаницу, поэтому необходимо четко объяснить различие между щитовыми проходками и ТБМ.

Согласно китайскому привычному представлению, можно выделить три основных отличия проходческих щитов от ТБМ:



Рис. 1-2. Форма ТБМ

*Первое отличие* заключается в способе стабилизации забоя туннеля. Данный метод является важным аспектом в принципе работы проходческого щита, а также главным аспектом, отличающим щит от ТБМ. Метод щитовой проходки включает в себя следующие условия: стабилизация поверхности забоя, проходка туннеля и футеровка. Различие современных проходческих щитов и ТБМ заключается в том, что проходческий щит обладает такими функциями защиты забоя, как стабилизация давления в глине, земле. ТБМ, главным образом, применяется в горных породах, где вмещающая порода может быть самоустойчивой. Объектом проходки являются горные породы. ТБМ в отличие от проходческого щита не обладает функциями защиты забоя, такими как стабилизация давления в глине, земле, также не имеет механизма активной стабилизации поверхности забоя.

*Второе отличие* заключается в способе обеспечения движущей силы. Движущая сила в проходческом щите обеспечивается при помощи туннельных тюбингов. В то время как движущая сила ТБМ в основном достигается за счет силы трения в туннеле между опорной пятой и вмещающей породой.

*Третье отличие* состоит в форме резцовой головки. При вращении резцовая головка проходческого щита может вращаться в обоих направлениях, а у ТБМ обычно вращается только в одном направлении. В резцовой головке ТБМ не установлены отверстия, за исключением проходов для выкапывания и сбора горного шлака, а на его передней стороне установлены отверстия для удаления шлака с рабочей поверхности.

В современном смысле взаимодействие технологий и широкое применение техники строительства туннелей повлияло на объединение некоторых технических особенностей проходческих щитов и ТБМ. Например, движущая сила ТБМ с одним экраном обеспечивается при помощи туннельных тюбингов. Наряду с этим существуют также многофункциональные проходческие комбайны, которые представляют собой гибрид проходческого щита и ТБМ с двухрежимной системой. Вопрос о классификации проходческого щита открытого типа остается открытым (в этом пособии его классифицируют как проходческий щит). В общем, вышесказанные отличия относятся больше к «форме», требуя принять во внимание адаптацию к характеру почвы, и на основе этих данных провести классификацию проходческих щитов и ТБМ.

Главное же отличие состоит в специфике работы ТБМ и проходческих щитов. Работа проходческих щитов основана на стабилизации забоя и контроле осадков туннеля. Таким образом, основная техническая функция проходческого щита заключается в сохранении стабильности забоя, контроле осадки конструкции туннеля, безопасном и эффективном удалении шлака, тем самым обеспечивает безопасность и успешность производства строительных работ. Основные функции работы ТБМ – высокоэффективное разрушение горных пород, поэтому главный технический вопрос ТБМ состоит в том, как эффективно разрушить горные породы, тем самым обеспечив высокую эффективность проходки. В XXI веке в Китае активно развивается подземное строительство, в частности метро, поэтому противоречия между стабилизацией пластов и способностью проходки слагаются в один объект с двумя важными аспектами, получив название «композитный проходческий щит».

Кроме того, способ выпуска шлака современных щитов основан на применении винтовых конвейеров и систем циркуляции для его удаления. Как правило, при этом производительность при проходке ниже, чем у ТБМ и потребляется больше энергии. Метод выпуска шлака у ТБМ заключается в том, что центральный ленточный конвейер погружается в отсек для выпуска шлака. Самая главная особенность заключается в том, что в слоях с хорошей устойчивостью вмещающей породы скорость вращения рабочего органа и эффективность труда при проходке обычно высокие, а расход электроэнергии меньше.

## **1.2. КЛАССИФИКАЦИЯ ПРОХОДЧЕСКИХ ЩИТОВ**

Выделяют следующие типы проходческих щитов: с открытым забоем, с воздушным пригрузом, с грунтопригрузом, гидropriгрузом, многофункциональный и другие.

### **1.2.1. Проходческий щит с открытым забоем**

Проходческие щиты открытого типа подразделяются на щиты полностью открытого типа и частично открытого типа. В том числе, проходческие щиты полностью открытого типа также можно называться щитом с открытым забоем (Open Face Shield, сокращенно – щит OF), в туннельном забое которых нет системы компенсации давления закрытого типа. Он не может противостоять давлению почвы и грунтовых вод. Обычно подходит для вмещающих пород с хорошей устойчивостью к забою (например, разнообразные невязкие и нелипкие пласты). Его преимущество заключается в том, что щит OF также можно использовать, даже когда часть или вся поверхность туннельного забоя представлена скальным грунтом или валунами. Кроме того, некруглую плоскость сечения камней можно вынимать при помощи ручного метода или частично механизированного.

Однако при недостаточной стабильности строительного пласта необходимо использовать вспомогательные средства для упрочнения пластов. Например, при выемке в пластах ниже уровня грунтовых вод или в просачивающихся пластах уровень грунтовых вод должен понижаться при помощи системы скважин-иглофильтров, а основание обрабатываться методом цементирования или замораживания. В соответствии с различными способами разработки, щиты полностью открытого типа подразделяются на щиты ручной разработки, полумеханической разработки, механической разработки и экструзионные.

#### *1) Щиты ручной разработки*

Они задействуют лопату, пневматический молоток, камнедробилку и другие инструменты для выемки грунта, при помощи которых ручным способом разрабатывается туннельный забой, относятся к основной форме проходческих щитов. Поскольку передняя часть проходческого щита ручной разработки открыта, то основным условием использования этого типа щита является недопущение разрушения забоя, по крайней мере, на этапе раскопок. Например, такой щит хорошо применим в средних слоях почвы, а также в пласте гравия с галеч-

ном. В зависимости от различных геологических условий забой может быть полностью открыт для искусственной выемки, используя только естественное давление почвы для поддержания поверхности выемки. Также может полностью или частично использоваться переднее крепление, базируясь на забое, земляные массы извлекаются отдельными пластами, грунтовые пласты поддерживаются во время выемки грунта. В водоносных пластах необходимо осуществить водопонижение, увеличить атмосферное давление или укрепить грунтовые массы.

Как правило, делювиальный (паводковый) пласт образован из слоев гравия, песка, консолидированного алеврита и глины, которые сами стабилизируются. В данном случае отлично подходит использование проходческого щита с ручной выемкой. Аллювиальные пласты, образованные из песка, ила и глины, не могут сами собой стабилизироваться, поэтому необходимо прибегать к дополнительным мерам.

На рис. 1-3 показан японский проходческий щит ручной выемки Мицубиси диаметром 10.92 м. Данный щит имеет гидравлическую, подвижную рабочую полку и нагрудную пластину для механической поддержки рабочей поверхности, при помощи них можно производить выемку сверху вниз, а также последовательно заменять опорные домкраты. Выкопанный грунт загружается в экскаватор с помощью ленточного конвейера с нижней половины. Объем выкопанного грунта соответствует объему грунта, выгруженного из туннеля. Поперечное сечение щита ручной разработки может быть круглым, прямоугольным или подковообразным.

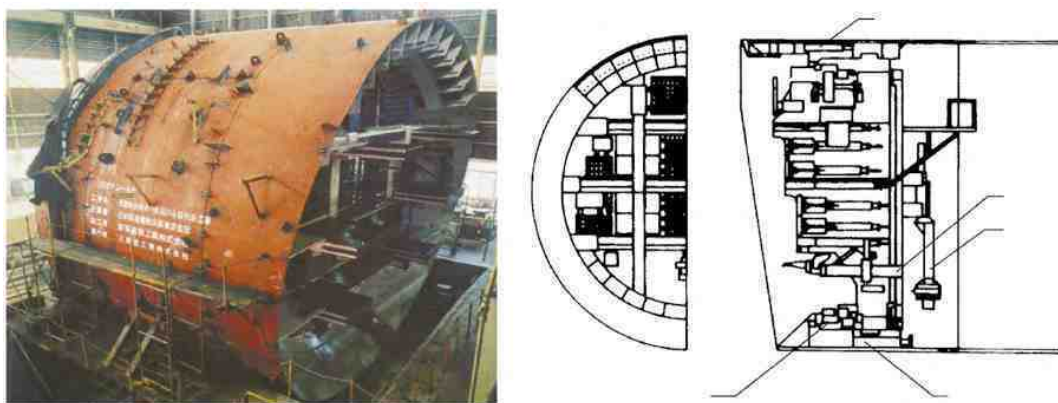


Рис. 1-3. Щит с ручной разработкой Мицубиси  $\phi$  10.92 м

Проходческий щит с ручной разработкой обладает следующими особенностями:

- (1) Широкая область применения к пластам от песчаной до глинистой почвы.
- (2) Поскольку передняя часть открыта, это облегчает устранение препятствий и способствует наблюдению за пластами грунта. Обвал передней части представляет угрозу как для рабочих, так и для техники.
- (3) Стоимость изготовления такого щита невысокая, неполадки случаются редко, но скорость проходки и эффективность низкие, интенсивность труда высокая, высокий уровень шума, и стоимость рабочей силы велика. В настоящее время проходческие щиты с закрытой лицевой стороной, которые не опираются на вспомогательные конструкции, широко используются, за исключением отдельных особых случаев, таких как использование механизированных или полумеханизированных щитов для рытья неэкономичных туннелей с коротким расстоянием; забой с большим гравием и другие сложные случаи.

2) Полумеханический проходческий щит (выемка с частичным поперечным сечением)

Из-за низкой скорости проходки щита с ручной выемкой, а также плохих рабочих условий был разработан малозатратный и высокопроизводительный полумеханический щит, показанный на рис. 1-4.

Полумеханизированный щит является переходной моделью (между немеханизированным и механизированным), но он имеет больше сходств с немеханизированным проходческим щитом. Ниже приведены отличия полумеханического и немеханического проходческих щитов:

(1) Полумеханический щит предназначен для благоприятных пластов пород, в которых преобладают пролювиальные отложения песка, гравия, консолидированного алевролита и глины. Несмотря на то, что полумеханический щит также может применяться в мягких аллювиальных отложениях, его необходимо сочетать с методами сжатия воздуха или применять вспомогательную меру по понижению уровня грунтовых вод и улучшению грунтового основания.

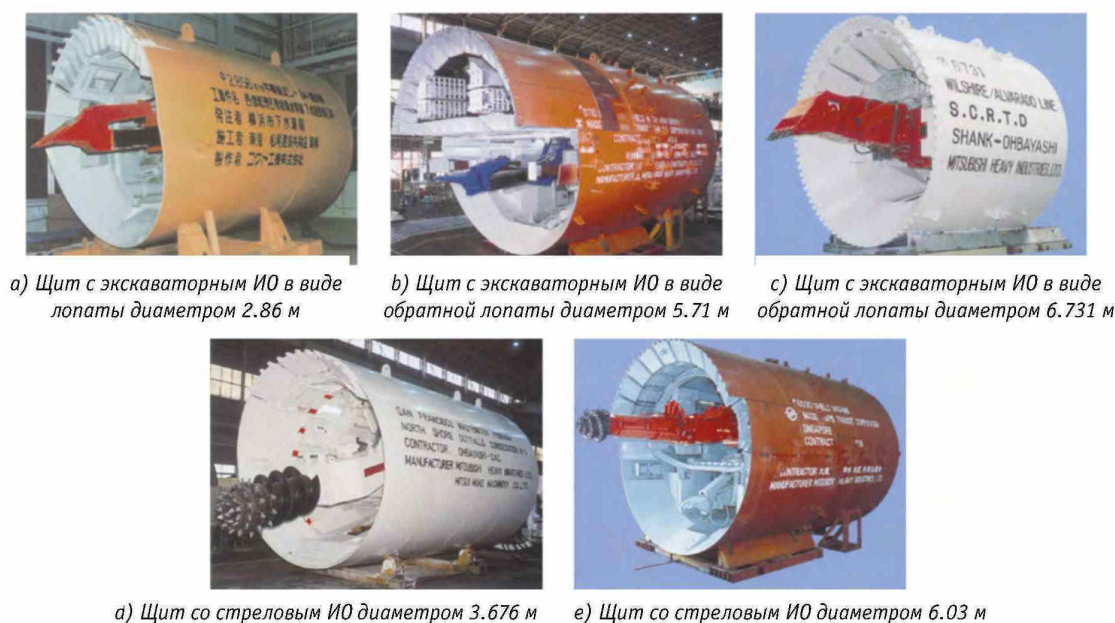


Рис. 1-4. Полумеханические проходческие щиты

(2) Полумеханический щит представляет собой проходческий щит открытого типа, который оснащен специальными механическими приспособлениями для выемки грунта (например, ленточный или винтовой конвейер) или землеройной техникой с функциями проходки туннеля и выемки шлака вместо ручного труда. В том числе механическое копательное устройство может перемещаться вперед-назад, влево-вправо, вверх-вниз. Помимо этого, оснащено обратной лопатой экскаваторного исполнительного органа (ИО), фрезерной головкой, которые взаимозаменяемы либо каждая может сочетать обе функции.

(3) Верхняя часть полумеханического щита такая же, как и у щита с ручной разработкой. Она оснащена подвижным передним карнизом для предотвращения обрушения забоя, опорным домкратом и другими инструментами. Также часто применяется гидравлическое управление нагрудной пластиной. Нагрудная пластина размещается в отдельной области или на периферии корпуса щита, чтобы поддерживать забой туннеля.

(4) Полумеханический щит также подходит для прокладки туннеля с некруглым сечением. Щит, показанный на рис. 1-5, является щитом ECL (Extruded Concrete Lining) – экструдированная бетонная футеровка, которую использует японская железнодорожная компания Такасаки при строительстве линии высокоскоростных железных дорог Хокурику-синкансэн. То есть вместо традиционной футеровки из трубного листа заливается бетон. Экструдирован-

ная бетонная футеровка выполняется одновременно с прокладкой щита. Поперечное сечение данного туннеля имеет подковообразную форму. Длина туннеля составляет 3580 м, почва состоит из мягких и среднетвердых пород

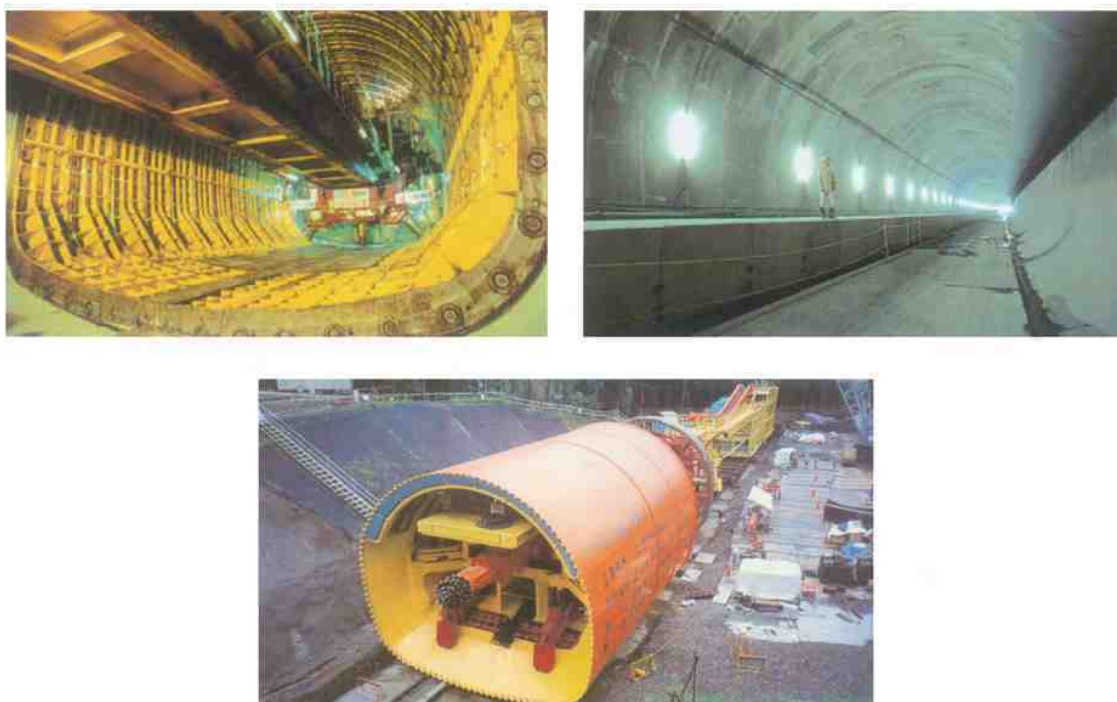


Рис. 1-5. Щит с ручной разработкой Мицубиси  $\phi$  10.92 м

В зависимости от места установки оборудования для выемки грунта полумеханические щиты можно разделить на следующие типы:

(1) Нижняя часть забоя щита оснащена ковшем, фрезерной головкой и другими инструментами.

(2) Верхняя часть забоя щита оснащена ковшем, а нижняя часть – фрезерной головкой.

(3) Центр щита оснащен фрезерной головкой.

(4) В центре щита расположен ковш.

Среди них форма (1) подходит для пластов, которые необходимо поддерживать забоем. Формы (2) ~ (4) подходят для устойчивых пластов. Форма (2) в основном подходит для прослоек суглины и гравия. Форма (3) подходит для слоев консолидированной глины, твердого песка. Форма (4) – для смешанных слоев из глины и гравия. К настоящему времени полумеханический щит уже практически не применяется.

### 3) Механический (полнопрофильный) щит

Когда грунтовый слой устойчив или может стать устойчивым после применения вспомогательных средств, в надрезной части устанавливается резцовая головка, адаптированная диаметру щита, для открытой механической разработки. Как показано на рис. 1-6, механический щит (также называется механический щит полностью открытого типа) представляет собой использование вращающегося рабочего органа вблизи поверхности забоя для полносекционной выемки. Резцовая головка подразделяется на одноосный, двухосный, многоосный и другие типы. Среди них наиболее широкое применение получил одноосный тип, поскольку почва и песок, извлеченные с помощью этого типа щита, загружаются на ленточный конвейер при помощи вращающегося ковша и желоба, которые непрерывно выполняют выемку и выгрузку

грунта. Резцовую головку механического щита можно разделить на два типа: панельная и спицевидная (лучевая).

Среди них механический щит с резцовой головкой панельного типа предназначен для поддержания стабилизации забоя через панель, а также для решения вопроса разгрузки камней и гальки через степень открытости. Механический щит с резцовой головкой спицевидного типа обычно используется для стабилизации забоя у щитов с малым поперечным сечением в скальных и галечных образованиях.

Механический щит обладает следующими характеристиками:

(1) Помимо улучшения условий эксплуатации и экономии рабочей силы, он также значительно повышает скорость продвижения и сокращает срок строительства.

(2) В отличие от щитов ручной разработки и полумеханических стоимость механического щита дороже, и он не применяется для коротких туннелей.

(3) Механических щитов в отличие от щитов с ручной разработкой и полумеханических щитов в основном применяется в аллювиальных отложениях, где забой легко стабилизировать. В аллювиальных образованиях, в которых нелегко стабилизировать забой, следует сочетать методы сжатия воздуха, понижения воды, укрепление цементом и т. д. В настоящее время практически не используются.

4) Экструзионный щит можно разделить на следующие типы: перекрывающий (накладная пластина), спиральный, экструзии сетки

Экструзионный щит накладной пластины. Данный тип использует перекрывающую пластину для закрытия большей части забоя, оставляя только часть отверстия для установки площади регулируемого перекрытия для отвала грунта. Передняя проникающая порода этого щита продвигается вперед, так что почва и песок в проникающей части превращаются в пласты и продвигаются, а грунт выгружается через перекрытие. Стабилизация забоя зависит от регулировки размера отверстия крышки и сопротивления выгрузке грунта, а также способствует достижению равновесия между тягой домкрата и давлением почвы в забое. На рис. 1-7 показан японский экструзионный щит Мицубиси с 32-метровой перекрывающей пластиной.

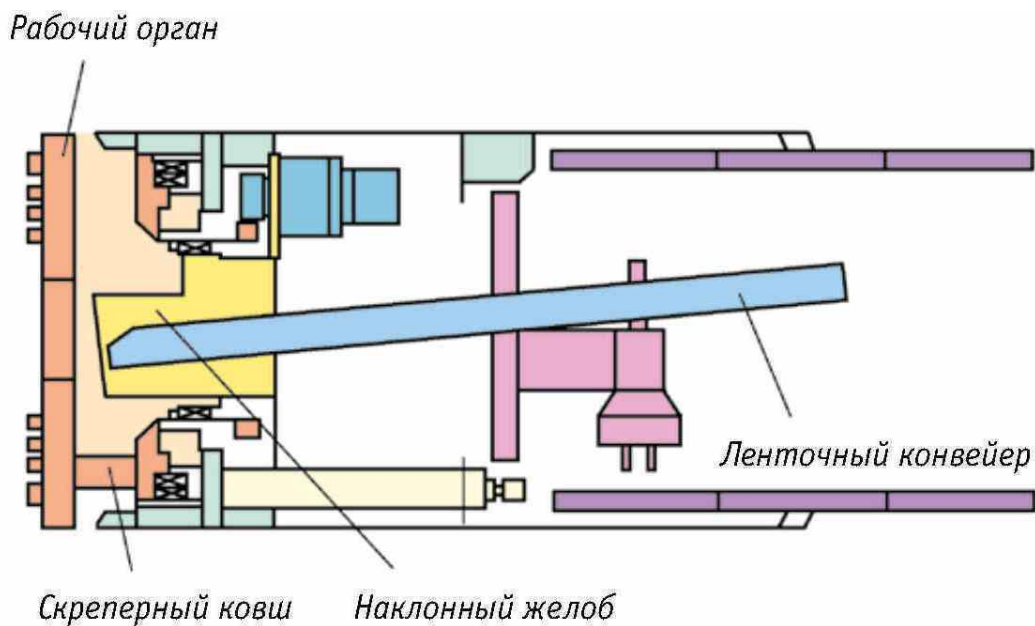


Рис. 1-6. Механический щит

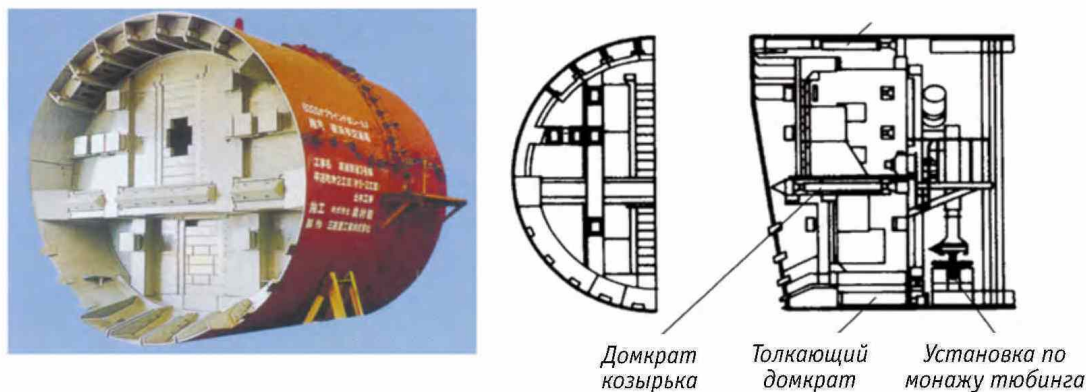
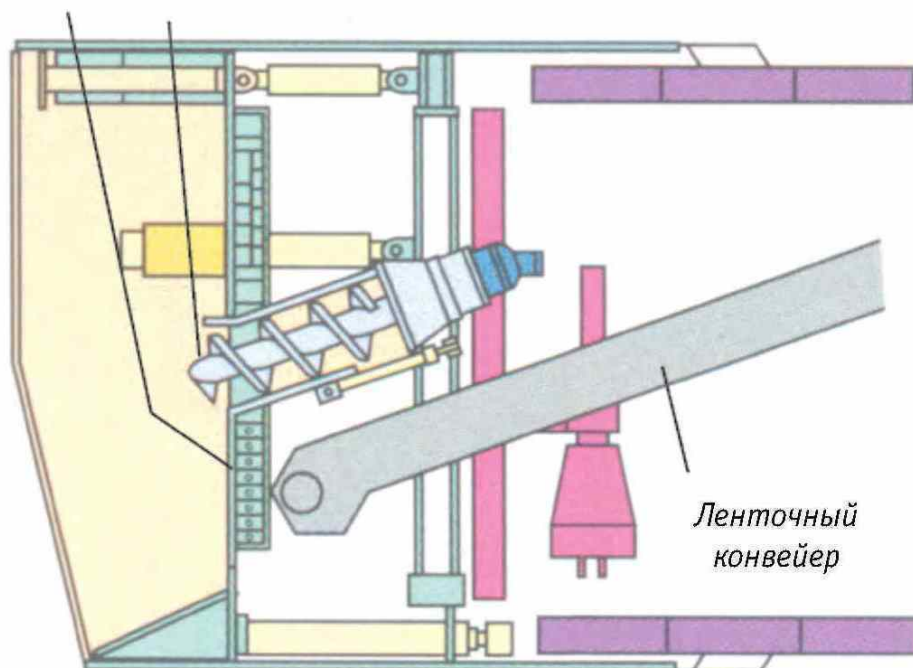


Рис. 1-7. Щит экструзионный с перекрывающей пластиной

Экструзионный щит в виде винтового грунтоотвода. С помощью уплотнительной пластины забой закрывается. При таком типе щита вмещающие породы продвигаются вперед. При продвижении песчаные почвы пластифицируются и вытекают, затем выгружаются через винтовой конвейер. Стабильность забоя достигается за счет регулировки скорости вращения винтового конвейера и открытия шлюза отвода грунта, чтобы тяга домкрата и давление грунта в забое достигали равновесия. Схема принципа работы показана на рис. 1-8.

Когда сетчатый экструзионный щит функционирует в подходящих пластах, осадка поверхности может контролироваться в средней или небольшой степени, поэтому он часто применяется в мягких слоях почвы. Сетчатый экструзионный щит обладает следующими характеристиками:

Плита перегородки Шнековый транспортер



*Рис.1-8. Принципиальная схема работы экструзионного щита в виде винтового грунтоотвода*

1. Объем выемки грунта близок или равен объему выемки во всех туннелях, а также для него часто характерно местное сжатие.

2. Щит оснащен решеткой из стальной пластины спереди. В процессе продвижения срез решетки используется для сжатия и разрезки переднего грунта на мелкие куски. Сила трения между боковой областью разреза, уплотнительной пластиной, сетчатой решеткой и земляными массами уравнивает боковое давление переднего пласта, чтобы достичь цели стабилизации забоя. Для него характерна простая конструкция, легкость в эксплуатации и несложность в удалении препятствий.

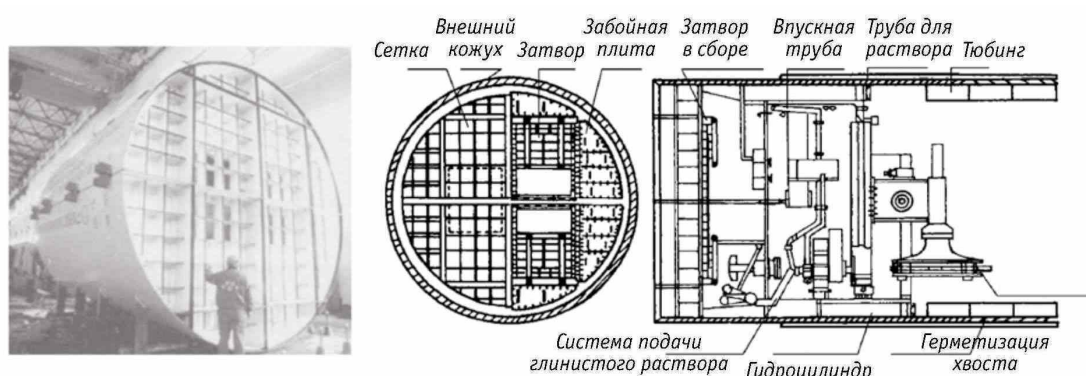
3. Срезанный грунт можно транспортировать при помощи поворотного диска, ленточного конвейера, шахтной тележки или гидравлического оборудования.

4. В передней решетке сетчатого экструзионного щита площадь отверстия небольшая. Он подходит для эксплуатации в мягких слоях глины и частично в алевроитовых слоях. Метода локального давления может использоваться в шламовом призабойном отсеке для стабилизации передней части земляных масс или в водоносных пластах в сочетании с методами осушения пластов.

В сочетании с различными методами выемки грунта сетчатый экструзионный щит можно разделить на два вида: для сухой и водяной выемки. На *рис. 1-9* показан механический щит с водяной выемкой сетчатого экструзионного типа.

### **1.2.2. Проходческий щит с воздушным пригрузом**

Проходческий щит с воздушным пригрузом, или проходческий щит с балансом атмосферного давления (Air Pressure Balance) сокращенно называют проходческий щит АРВ. Но атмосферное давление не может прямо противостоять давлению почвы. Под воздействием атмосферного давления с естественной или механической поддержкой может косвенно уравниваться гидростатическое давление грунтовых вод и давление почвы. Способ выемки можно выбрать ручной или механический, а поперечное сечение может быть частичным или полным.



*Рис. 1-9. Механический щит экструзионного типа*

В соответствии с принципом работы проходческий щит с воздушным пригрузом должен иметь отсек под рабочим давлением. В более ранних проходческих щитах с воздушным пригрузом был закрыт длинный отсек под рабочим давлением между туннельным забоем и туннелем для остановки воды. Поэтому большинство работников часто находились в среде

сжатого воздуха. Современный проходческий щит с воздушным пригрузом оснащен опорным давлением только в кабине экскаватора. Его также называют проходческим щитом с локальным атмосферным давлением (в Японии его называют «проходческим щитом с предельно сжатым воздухом»). Этот вид щита оснащен уплотнительным сепаратором, который может герметизировать забой и изолировать его от завершенного участка туннеля. Поэтому он может обеспечить безопасную эксплуатацию под атмосферным давлением. На *рис. 1-10* показан японский 25-метровый проходческий щит с воздушным пригрузом Мицубиси диаметром 5.25 м, который отводит грунт через вращающуюся воронку шарового клапана и одновременно обеспечивает стабилизацию давления в забое. На *рис. 1-11* показана фотография места выброса грунта с вращающейся воронки шарового клапана.



*Рис. 1-10. Щит сжатого воздуха Ø 5.25 м*



*Рис. 1-11. Дренаж с поворотной воронкой с шаровым клапаном*

Проходческий щит сжатого воздуха подходит для глины, вязких песчаных почв и заполненных водой мягких слоев. При работе в непригодных пластах частицы грунта теряют равновесие из-за воздушного потока, и тонкий слой земляных масс в туннельном забое по причине утечки может спровоцировать «извержение». Проходческий щит сжатого воздуха из-за крайне неудовлетворительных условий работы заменен на проходческий щит с гидropriгрузом.

### **1.2.3. Проходческий щит с грунтопригрузом**

Передняя часть проходческого щита с грунтопригрузом (Earth Pressure Balance), сокращенно щит ЕРВ, снабжена сепаратором, а отсек для выемки грунта отделен резцовой головкой, срезным кольцом, сепаратором и винтовым конвейером, как показано на *рис. 1-12*. Его принцип работы заключается в следующем: резцовая головка вращается, чтобы разрезать забой, а разбитый грунт попадает в отсек для грунта через отверстие в резцовой головке. Когда грунт попадает на дно грунтового отсека, он при помощи винтового конвейера транспортируется на ленточный конвейер, а затем к шлаковозу, припаркованному на трассе. Грунтовой отсек и винтовой конвейер заполнены срезанным грунтом и полагаются на тягу гидравлического цилиндра для создания давления в грунтовой отсеке при выемке шлака для того, чтобы грунтовое давление влияло на стабилизацию забоя. Кроме того, корпус щита выполняет временную защитную роль в вырытом без футеровки туннеле, выдерживает давление окружающего слоя грунта и грунтовых вод, а также изолирует подземные воды.

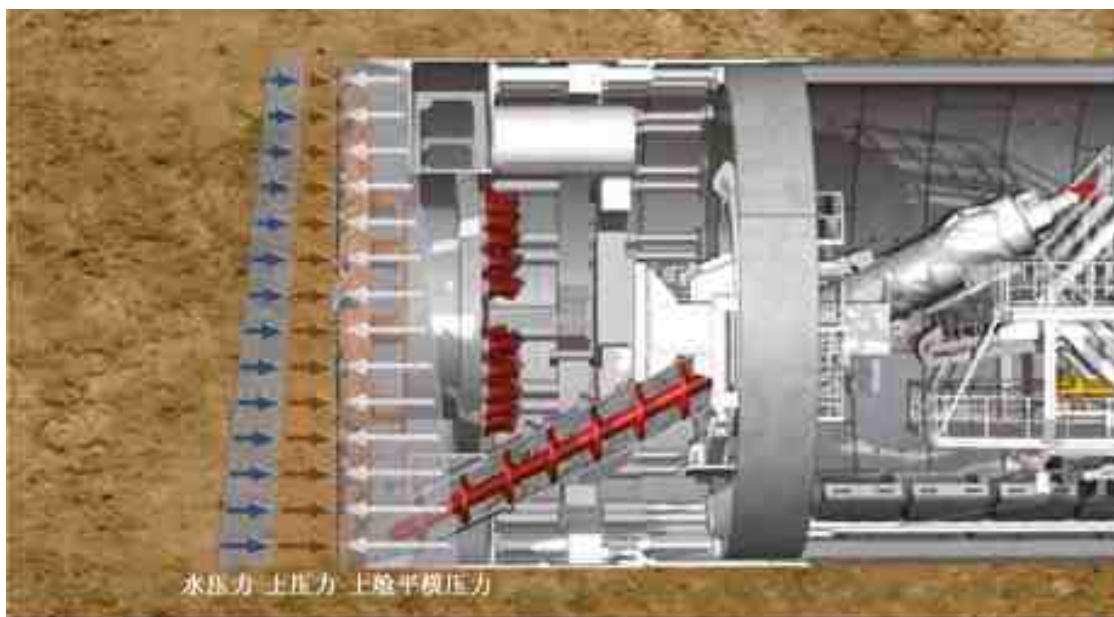


Рис. 1-12. Принцип работы щита с грунтопригрузом

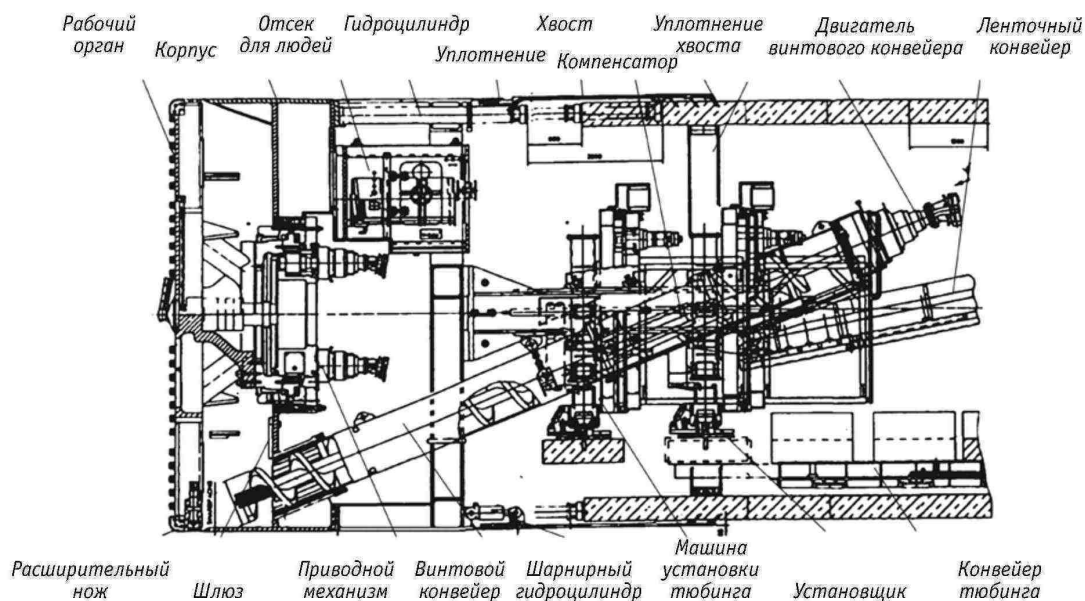


Рис. 1-13. Щит с грунтопригрузом

Проходческий щит с грунтопригрузом состоит из корпуса, рабочего органа, приводного механизма рабочего органа, винтового конвейера, ленточного конвейера, машины для установки тубинга, отсека для людей, гидравлической системы и т. д., как показано на рис. 1-13.

#### (1) Винтовой конвейер

Винтовой конвейер состоит из цилиндрической части, приводного устройства, винтового вала и затвора для выпуска шлака. Винтовой конвейер разделен в соответствии со структурой привода. И имеет, как правило, две структурные формы: периферийного привода и центрального привода, то есть – осевой винтовой конвейер и ленточный винтовой конвейер (рис. 1-14). Его характеристики заключаются в следующем:

Осевой винтовой конвейер имеет компактную структуру, которая удобна для расположения смежных элементов. Отверстие для выхода шлака у ленточного винтового конвейера находится на задней части, положение выхода также повышено. Когда грунтовой шлак проходит через безосевой участок, он накапливается и уплотняется под воздействием собственной силы тяжести и образует грунтовой засор. Таким образом, грунтовой шлак в некоторой степени обладает определенной непрерывностью и может выполнять функцию закрытия воды.

Основная функция винтового конвейера заключается в непрерывной выгрузке грунта из грунтового отсека проходческого щита наружу; земляные массы образуют герметичный почвенный засор во время выгрузки грунта наружу, предотвращая обезвоживание почвы и поддерживая стабилизацию давления грунта в грунтовом отсеке; путем автоматического сравнения значения давления грунта в отсеке проходческого щита с заданным значением давления грунта, в любое время можно отрегулировать скорость выгрузки грунта наружу, проконтролировать непрерывный динамический процесс баланса давления грунта в отсеке щита, чтобы обеспечить непрерывный процесс проходки щита.



*Рис. 1-14. Винтовой конвейер*

## **(2) Ленточный конвейер**

Ленточный конвейер (рис. 1-15) состоит из кронштейна ленточного конвейера, переднего ведомого колеса, заднего ведущего колеса, верхнего и нижнего опорного колеса, ленты, устройства для натяжения ленты, устройства для очистки ленты и приводного двигателя с редуктором и т. д. Ленточный конвейер установлен и расположен на заднем опорном соединительном мосту и прицепе, который используется для вывода шлака из винтового конвейера в опорную вагонетку, расположенную за щитом. Ленточный конвейер оснащен электроприводом или гидравлическим приводом. По соображениям безопасности на нем установлено три выключателя аварийной остановки.



Рис. 1-15. Ленточный конвейер

### (3) Защитное хвостовое уплотнение и его система смазки

#### 1. Защитное хвостовое уплотнение

В хвостовом уплотнении щита используется уплотнительное устройство с кордощеткой (рис. 1-16), представляющее собой конструкцию, объединяющую пружинную сталь, кордощетку и металлическую сетку из нержавеющей стали. Насос для смазки хвостового щитка подает смазку между каждым уплотнением проволоочной щетки для повышения эффективности закрытия воды.

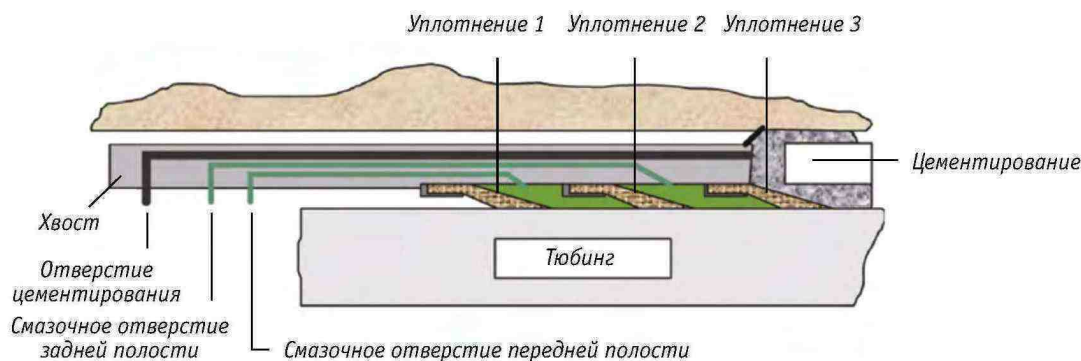


Рис. 1-16. Применение системы уплотнения хвостовой части с тремя кордощетками

#### 2. Система смазки для уплотнения хвостовой части щита

Неисправность хвостового уплотнения щита является одной из основных причин несчастных случаев при использовании проходческого щита в туннельных работах. Являясь одной из ключевых подсистем обеспечения нормальной проходки щита, система смазки для уплотнения хвоста щита использует пневматические насосы для впрыскивания смазки в каждую ветвь через каждый шунтирующий клапан, чтобы уплотнить хвост щита. Полость между щетками для уплотнения хвоста щита заполняется смазкой для уплотнения, чтобы предотвратить попадание воды и грязи внутрь щита. Методы управления подразделяются на ручной и автоматический, а автоматическое управление подразделено на контроль давления и контроль времени.

### 1.2.4. Проходческий щит с гидропригрузом

Проходческий щит с гидропригрузом (Slurry Pressure Balance Shield), сокращенно проходческий щит SPB, используется в качестве опорного материала смешанную суспензию из грязи (известна как глинистый раствор). Как показано на *рис. 1-17*, принцип работы заключается в следующем: глинистый раствор подается в грязевую камеру, образуя непроницаемую грязевую пленку на поверхности забоя, через которую грязевая пленка уравнивает давление воды и почвы, действующее на забой. Извлеченный шлак транспортируется на землю в виде глинистого раствора, отделяется оборудованием для обработки грязи, а отделенная грязь и вода повторно измельчаются, а затем транспортируются к забою. Щит с гидропригрузом подходит для широкого геологического диапазона почв, от слабых слоев песчаного грунта до сложных формаций.

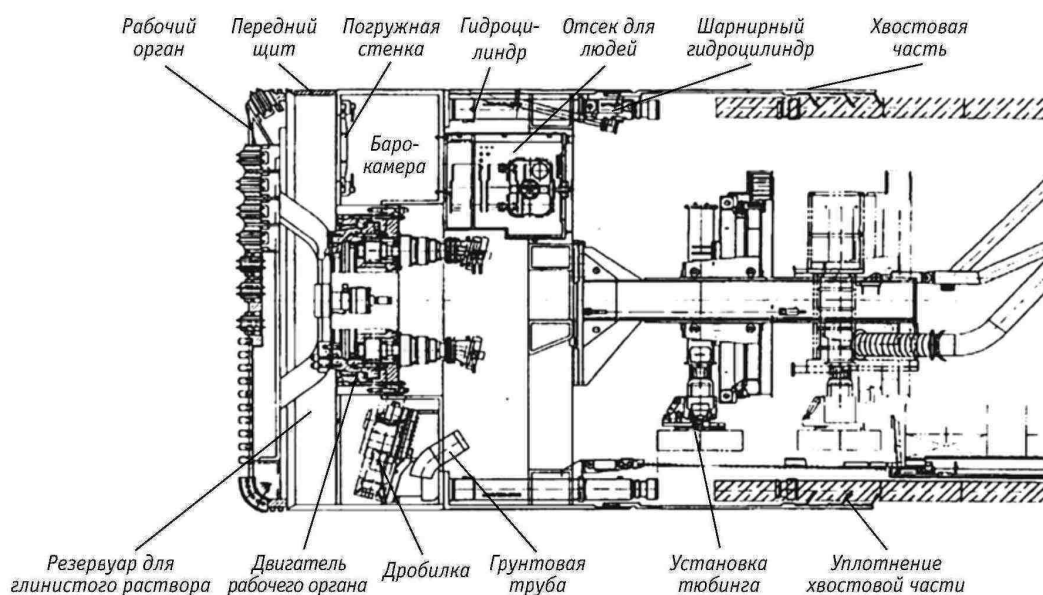


Рис. 1-17. Схема щита с гидropriгрузом (немецкая система)

### 1) Классификация щитов с гидропригрузом

Щиты с гидропригрузом можно разделить на щиты с непосредственным контролем и щиты с косвенным контролем.

(1) Проходческие щиты с гидropriгрузом прямого контроля

Как показано на *рис. 1-18*, система глинистой воды щита прямого контроля использует режим баланса глинистой воды. Передняя часть данного механического щита снабжена уплотнительным сепаратором, резцовой головкой и приводным гидроцилиндром; между сепаратором и забоем образован резервуар для глинистой воды, а внутренняя часть заполнена глинистым раствором. Принцип работы заключается в использовании объема циркулирующей суспензии для регулировки и контроля давления глинистого раствора. Глинистый раствор используется в качестве опорного материала; глинистый раствор подается в камеру для грязи и используется для образования непроницаемой пленки грязи на забое. Давление поддерживается за счет натяжения пленки, чтобы сбалансировать давление почвы и воды в забое (стабилизация забоя).

После того, как извлеченный шлак и глинистый раствор смешиваются, глинистый раствор транспортируется шламовым насосом на станцию отделения глинистой воды. После этого она входит в резервуар для регулировки глинистой воды. Наконец отправляется в резервуар шита с помощью шламового насоса для повторного использования. Объем циркулирующей

суспензии в вышеупомянутом шламовом резервуаре может быть выполнен путем регулировки скорости грязевого насоса или регулировки открытия регулирующего клапана.

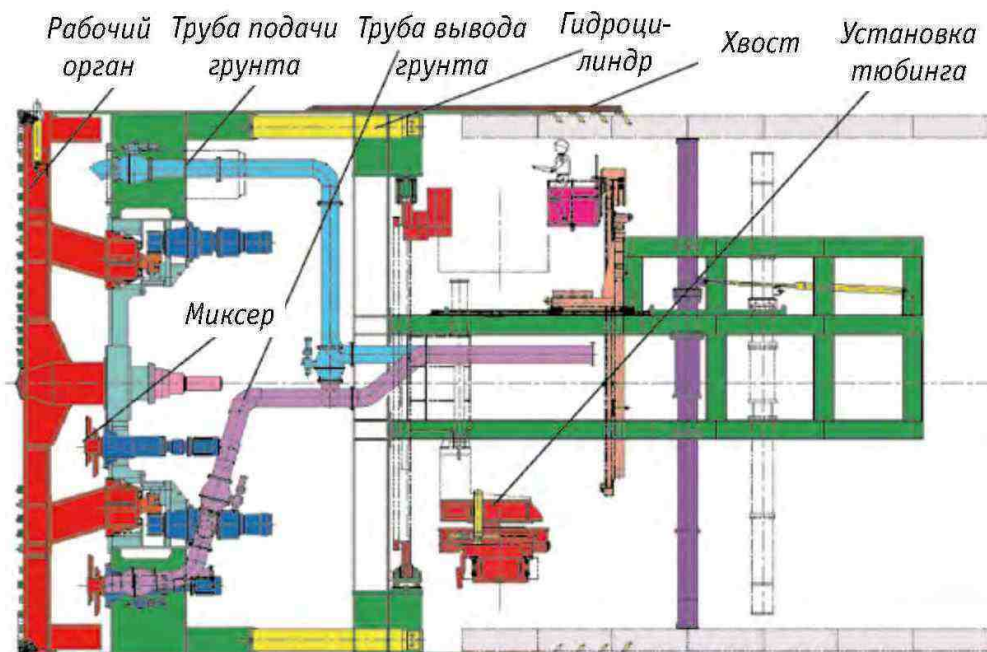


Рис. 1-18. Щит с гидropriгрузом прямого контроля (японская система)

## (2) Щит с гидropriгрузом с косвенным контролем

На рис. 1-19 показан щит с гидropriгрузом с косвенным контролем. Шламовая система состоит из двух контуров глинистого раствора и воздуха, поэтому ее также называют комбинированным режимом. На рисунке щит с грунтопригрузом с косвенным контролем вставлен с полуотделителем в резервуар для глинистой воды. Глинистый раствор под давлением заполняется перед полуотделителем, а сжатый воздух заполняется выше линии оси щита полуотделителя для образования воздушного буферного слоя. Давление воздуха действует на поверхность контакта с глинистым раствором за полуотделителем. Поскольку газ и жидкость на контактной поверхности имеют одинаковое давление, поэтому до тех пор, пока давление воздуха регулируется, можно поддерживать соответствующее давление глинистого раствора в забое.

При проходе щита из-за потери глинистого раствора или изменения скорости движения, количество отправляемой и выгружаемой глинистого раствора теряет равновесие, и поверхность контакта с воздухом-жидкостью будет колебаться вверх и вниз. В это время с помощью датчика уровня жидкости скорость бурового насоса регулируется в соответствии с изменением уровня жидкости, так что уровень жидкости восстанавливается до заданного положения, чтобы поддерживать гидравлическую стабильность забоя. Производительность бурового насоса увеличивается с уменьшением уровня жидкости и уменьшается с увеличением уровня жидкости. На самом высоком и самом низком уровнях жидкости имеется ограничитель. Буровой насос останавливается, когда жидкость снижается до самого низкого уровня или достигает самого высокого уровня. Из-за воздушного буферного слоя уровень жидкости колеблется, это не оказывает очевидного влияния на изменение давления поддерживающего раствора.

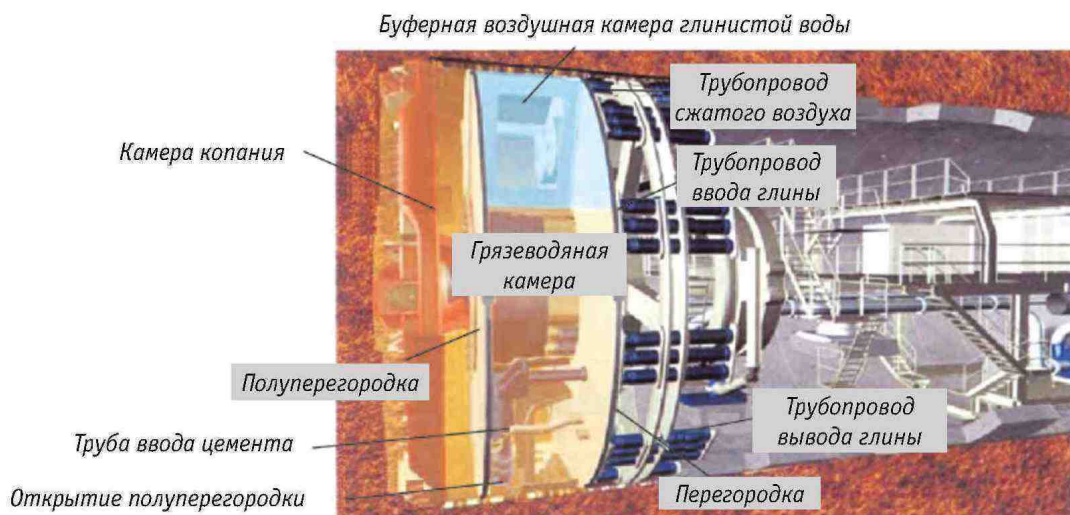


Рис. 1-19. Щит с гидропригрузом с косвенным контролем (немецкая система)

### (3) Анализ различий

1. По сравнению с однокабинной конструкцией щита с гидропригрузом прямого контроля щит с гидропригрузом косвенного контроля в резервуаре для глинистой воды имеет резервуар для воздушного балласта с двухкабинной конструкцией, в которой земляной резервуар заполнен глинистым раствором под давлением и соединен с резервуаром на воздушной подушке через погружную стенку внизу, чтобы сбалансировать внешнее давление воды и почвы. Можно увидеть, что управление щитом с гидропригрузом прямого контроля стало намного проще, упрочнение почвенного защитного слоя в забое стало еще надежнее, а контроль деформации поверхности стал эффективнее.

2. В щите с гидропригрузом прямого контроля колебания давления глинистой воды в кабине экскаватора довольно велики, как правило, в пределах  $\pm (0.5 \sim 1.0)$  бар (рис. 1-20a), а щит с гидропригрузом косвенного контроля может точно контролировать и регулировать давление через систему сжатого воздуха, поэтому колебания давления в кабине экскаватора невелики, как правило,  $\pm (0.1 \sim 0.2)$  бар (рис. 1-20b).

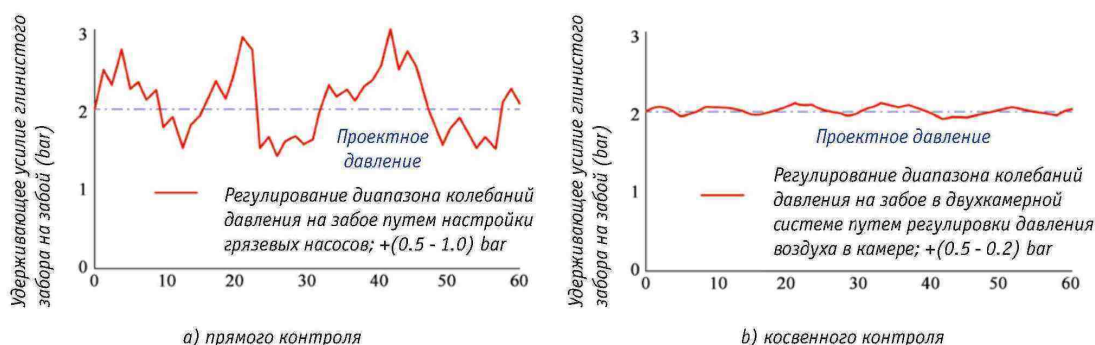


Рис. 1-20. График колебания давления щита с гидропригрузом

### 1) Образование системы щита с гидропригрузом

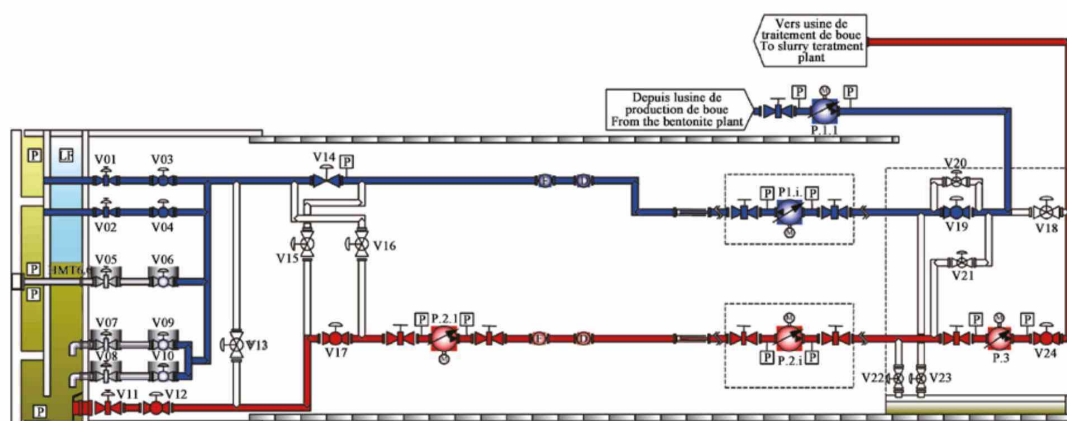
Щит с гидропригрузом состоит из следующих пяти систем: система проходки щита, которая использует резцовую головку для выемки на всей поверхности забоя во время продвижения; система циркуляции глинистой воды, которая может регулировать физические свойства глинистого раствора, направлять ее к забою для поддержания его стабильности; интегрированная система управления, которая комплексно управляет состоянием подачи и вывода глинистой воды, давлением глинистой воды и состоянием работы оборудования по очистке глинистой воды; система разделения и очистки глинистой воды; синхронная система цементной затирки швов на стенах.

Взяв в качестве примера щит с гидропригрузом прямого контроля, кратко представим типичный системный состав щита с гидропригрузом.

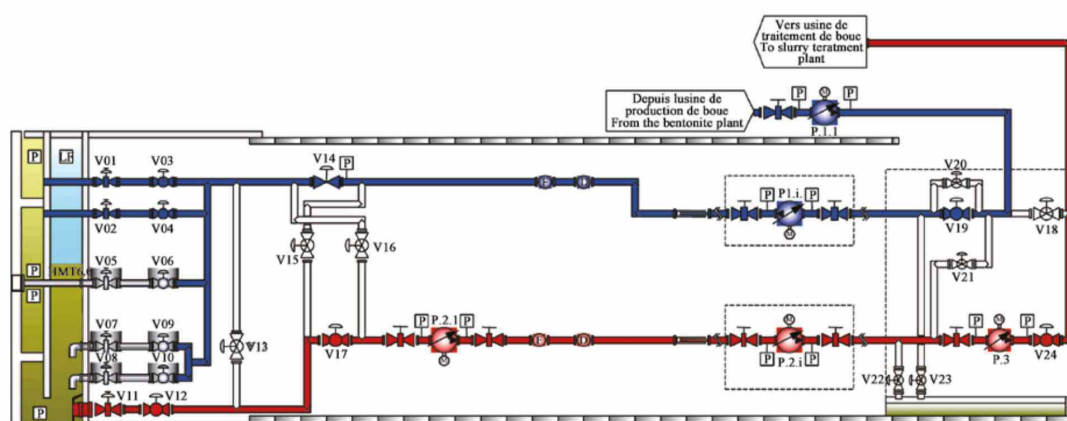
(1) Система циркуляции глинистой воды используется для регулировки физических свойств глинистого раствора, поддержания стабильности забоя и транспортировки глинистой воды из резервуара на станцию разделения с помощью бурового насоса. Система состоит из отправляющего (выгружающего) бурового насоса, отправляющей (выгружающей) буровой трубы, удлинительного трубопровода, вспомогательного оборудования и т. д. Среди них трубопровод подачи глинистой воды, ведущий в переднюю кабину в щите, разделен на пять секций (две, ведущие к резервуару для глинистой воды в верхней части; две, ведущие к резервуару на воздушной подушке в нижней части; и одна, ведущая к резервуару для глинистой воды в середину через центральное поворотное соединение); трубопровод для сброса грязи (трубопровод в нижней части щита) оснащен P2.1 насосом, промежуточным бустерным насосом P2.i и промежуточным бустерным насосом P3, а также другими насосами для выброса глинистой воды; плотность и расход глинистой воды измеряются гамма-плотномером и электромагнитным расходомером, установленными на каждом трубопроводе, соответственно, положительное количество глинистой воды контролируется шламовым насосом.

Основным рабочим механизмом системы циркуляции глинистой воды является: буровой насос P1.1 и промежуточный насос P1.i, транспортирующие новый глинистый раствор, приготовленный в шламовом резервуаре, в шламовый отсек по трубе; шламовый насос P2.1, который выносит шлак из глинистой воды и оборудования для очистки глинистой воды, транспортируемого на землю по трубе, отделены.

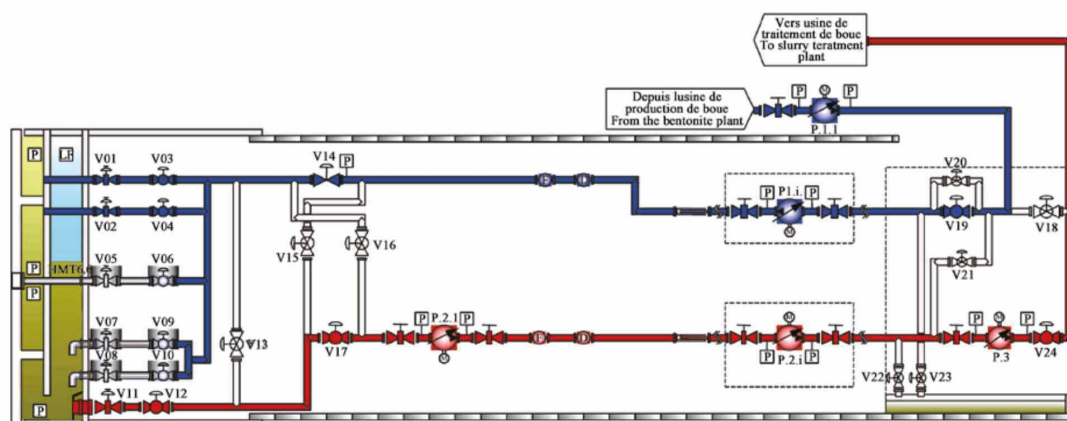
Методы управления системой циркуляции глинистой воды подразделяются на ручное управление, полуавтоматическое и автоматическое. Режим автоматического управления включает в себя пять видов режима: раскопка, байпасирование, изоляция (при захвате), обратный цикл (также известный как регрессивный режим) и выключение (*рис. 1-21*).



a) режим раскопки



b) режим байпасирования



c) режим изоляции

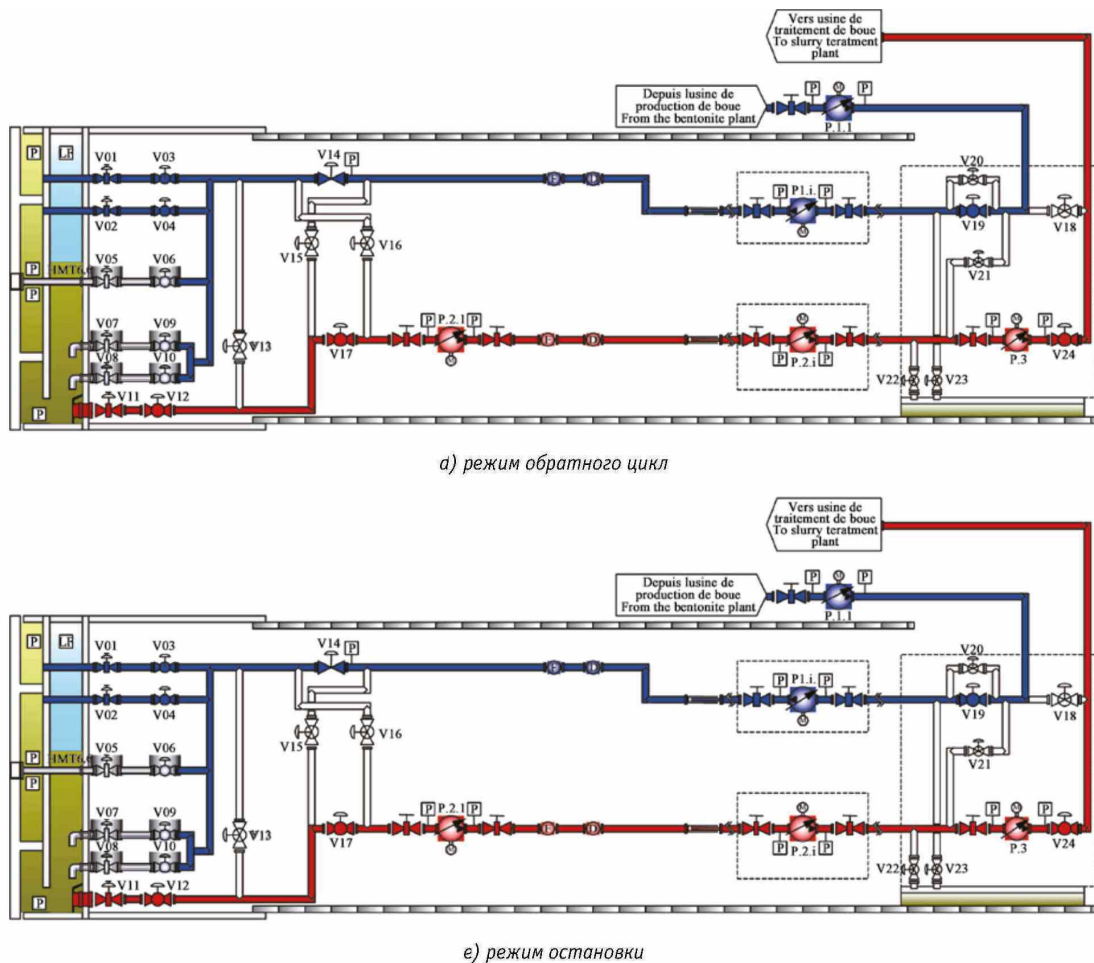


Рис. 1-21. Режимы автоматического управления

## (2) Система комплексного управления

Данная система используется для комплексного управления состоянием подачи и выброса глинистой воды, давлением глинистой воды, а также состоянием работы оборудования для его очистки.

## (3) Система разделения и очистки глинистой воды

Система очистки глинистой воды используется для отделения воды и почвы от глинистой воды, сбрасываемой со щита. Система расположена на земле и состоит из двух частей: станции разделения глинистой воды и оборудования для подготовки глинистого раствора. Среди них станция разделения в основном состоит из вибрационного грохота, циклона, фильтра-пресса (или центрифуги), резервуара для хранения глинистой воды, регулировочного бака, шламового насоса и т. д.; оборудование для подготовки глинистой воды состоит из отстойника, резервуара для смешивания глинистой воды, системы пульпирования и т. д. Ниже представлено краткое введение в основные компоненты системы разделения и очистки глинистой воды.

### 1) Станция разделения глинистой воды

Мощность станции разделения глинистой воды обычно делится на три уровня, среди которых: объектом обработки глинистой воды первого уровня являются песок и гравий с размером частиц более 74 мк. Процесс относительно прост. Отделенные частицы почвы отсеиваются с помощью оборудования, такого как вибрационный грохот или циклон, и транспортируются на автомобиле; объектом обработки глинистой воды второго уровня являются в основном мелкие частицы ила и глина размером менее 74 мк, которые не могут быть отделены

на первом этапе обработки; обработка третьего уровня должна отрегулировать значение pH оставшейся глинистой воды, подлежащей выгрузке. При необходимости следует использовать фильтр-пресс (или центрифугу) для дальнейшего разделения глинистой воды и воды, чтобы можно было выгрузить оставшуюся глинистую воду и воду. Выбросы соответствуют национальным требованиям по охране окружающей среды и используемые материалы в основном представляют собой разбавленную серную кислоту или соответствующее количество углекислого газа.

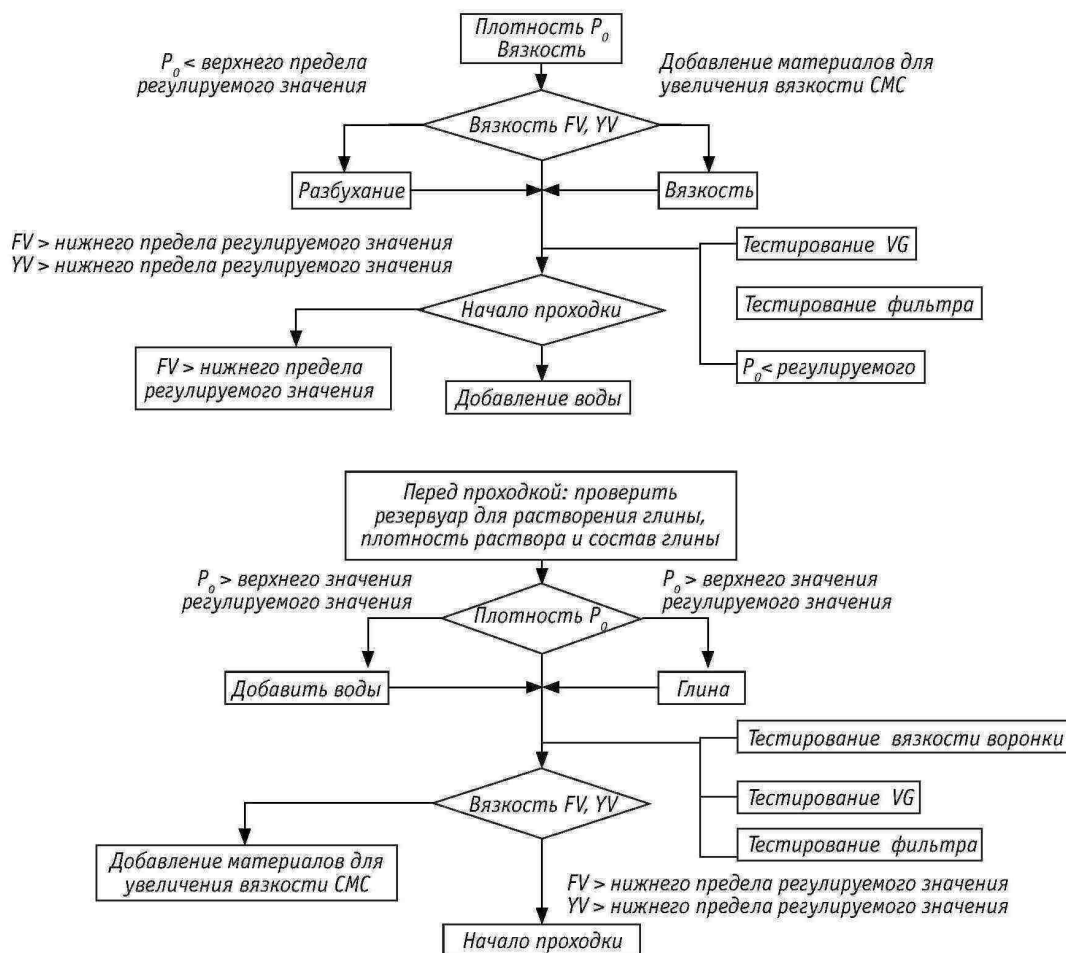


Рис. 1-22. Технологический процесс производства раствора: FV – изменение вязкости воронки; YV – контроль значения вязкости

## 2) Оборудование для подготовки глинистого раствора

Оборудование используется для разветвления глинистого раствора, отвечающего требованиям использования щита. Оно в основном включает резервуар для остаточного раствора, резервуар для растворения глины, резервуар для чистой воды, регулировочный резервуар, резервный резервуар СМС (очиститель), перемешивающее устройство и т. д. Процесс производства глинистой воды показан на рис. 1-22. На рисунке глина и бентонит (порошковая глина) могут быть использованы для увеличения плотности, а СМС может быть добавлен для увеличения вязкости.

### 1.2.5. Двухрежимный и гибридный проходческий щиты

Когда туннель проходит через композитный пласт, любая из вышеперечисленных форм не может полностью соответствовать требованиям строительства туннелей. Одним из решений является выбор двух или более щитов в соответствии с определенными условиями формирования слоя, но это решение не только дорогостоящее, но и сложное для размещения нескольких щитов из-за ограничений площадки. Поэтому если позволяет пространство, необходимо расположить функциональные компоненты проходческого щита с грунтопригрузом, гидропригрузом на щите одновременно, чтобы сформировать двухрежимный или гибридный щит. Во время проходки туннелей такой щит может переключаться и корректировать свою функцию или режим работы в соответствии с геологическими и гидрологическими условиями; или выполнять аналогичное преобразование модульной конструкции различных форм функциональных компонентов щита.

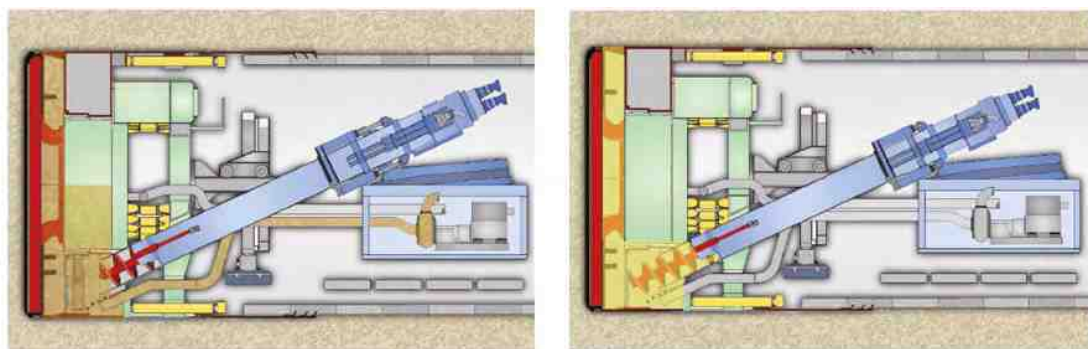
Двухрежимный щит или гибридный щит, по сути, представляет собой регулировку режима поддержки забоя, а также инструмента, системы транспортировки шлака и другого оборудования.

В этом разделе в основном представлены двухрежимный щит с грунтопригрузом и гидропригрузом, а также гибридный щит.

#### *1) Двухрежимный щит с грунтопригрузом и гидропригрузом*

Двухрежимный щит с грунтопригрузом и гидропригрузом объединяет концепцию дизайна и функции щитов с грунтопригрузом и гидропригрузом. Он сочетает в себе два режима давления глинистой воды и грунта, наиболее широко адаптируется к сложным и изменчивым композитным формациям и средам. Кроме того, двухрежимный щит может переключаться между двумя различными режимами туннелирования – с грунтопригруза на гидропригруз в зависимости от условий пластов. Использование режима давления грунта может снизить затраты на строительство; режим грунтопригруза может лучше справиться со строительством туннелей в прочных проницаемых пластах при высоком давлении воды.

Как показано на *рис. 1-23*, на двухрежимном щите с грунто- и гидропригрузом в режиме гидропригруза винтовой конвейер убирается и фиксируется, а затем устанавливаются гравийное устройство и решетка, используемые для откачивания шлака через буровой насос; в режиме грунтопригруза необходимо удалить гравийное устройство и решетку, а затем выдвинуть винтовой конвейер для шлака. Независимо от того, что это за трансформация, она осуществляется в нестабильных пластах, что является непростым делом.

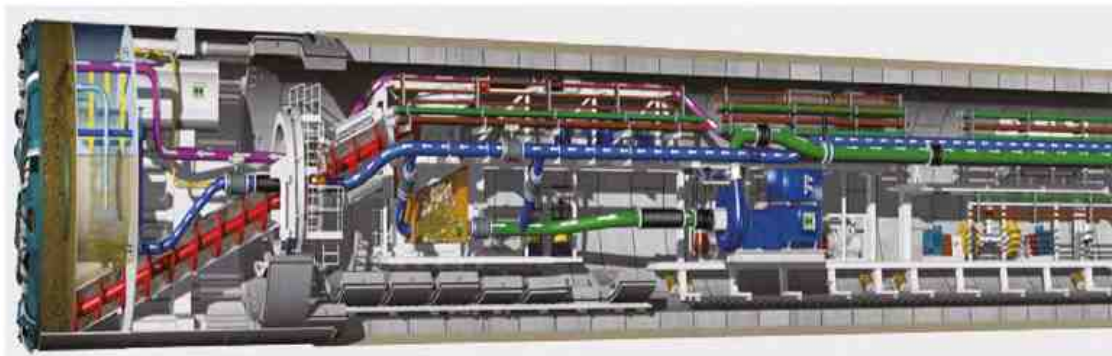


*Рис. 1-23. Смена режима в двухрежимном щите*

#### *2) Гибридный щит*

(1) Принцип работы гибридного щита (также называется щит с переменной плотностью) заключается в высокоэффективном, многофункциональном щите, который использует винтовой конвейер для выгрузки шлака из грунтового отсека. Он может быстро переключаться

между грунтопригрузом и гидropriгрузом. Щит в основном балансирует и поддерживает забой, регулируя плотность смеси бентонита и шлака. В то же время на выходе винтового конвейера установлена коробка регулировки шлака. Данный щит можно использовать как для выгрузки шлака из бурового трубопровода, так и для выгрузки шлака с ленточного конвейера для устранения частых геологических и гидрологических изменений, таких как переход грунта из мягких пород к твердым. Его структура показана на *рис. 1-24*.



*Рис. 1-24. Структурно-функциональная схема гибридного щита*

Основное отличие гибридного щита и двухрежимного щита состоит в том, что характеристики сбалансированной среды могут быть скорректированы в соответствии со стратиграфическими условиями – как твердыми, так и жидкими состояниями; во-вторых, изменение режимов может быть завершено от одного часа до одной недели и не требует давления в кабине отсека; в то время как изменение режима в двухрежимном щите занимает от одного до двух месяцев и часто требует выполнение работы в кабине отсека под давлением. Гибридный щит может быть оснащен всем сопутствующим оборудованием, обеспечивающим одновременно баланс давления в грунте и регулирующий давление в воздушной подушке, таким как винтовой конвейер, ленточный конвейер, буровой насос, буропровод, устройство регулировки давления воздуха и воздушный компрессор. Кроме того, были добавлены два уникальных устройства для адаптации к двухрежимному щиту. Этими двумя устройствами являются коробка регулировки шлака и заднее гравийное устройство. Роль регулировочной коробки для шлака заключается в использовании влажной расширенной почвы, смешанной с выгружаемым шлаком, для снижения ее плотности, чтобы удовлетворить потребности при откачке.

Гравийная дробилка, установленная сзади, используется для дробления камней крупного размера в выгружаемом шлаке для удовлетворения требований по крупности при откачке шлака.

В зависимости от различных геологических условий гибридный щит может иметь четыре режима работы.

Режим 1– обычный режим грунтопригруза, как показано на *рис. 1-25*.

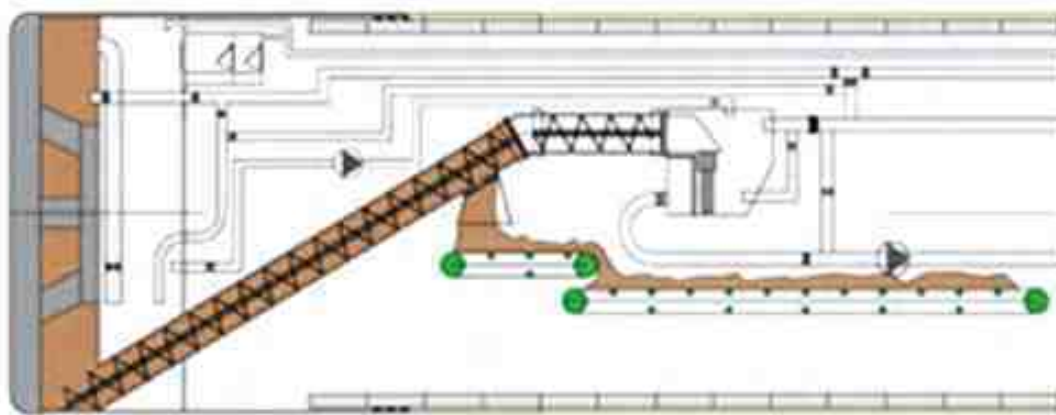


Рис. 1-25. Обычный режим грунтопригруза

Нет никакой разницы между обычным щитом по режиму грунтопригруза и обычным проходческим щитом с грунтопригрузом. Отсек для выемки можно использовать в режимах открытого типа, полуотсека или грунтопригруза. Шлак выгружается на ленточный конвейер через винтовой конвейер № 1 и транспортируется наружу. Винтовой конвейер № 2, бак регулировки шлака, гравийная машина, установленная сзади, буровой насос и буровой трубопровод не работают.

Режим 2 – режим грунтопригруза вместе с гидропригрузом, как показано на рис.1-26. Конструкция щита в режиме 1 увеличивает функцию нагнетания бентонитовой суспензии в кабину экскаватора на основе грунтопригруза режима 1, увеличивая плотность шлака.

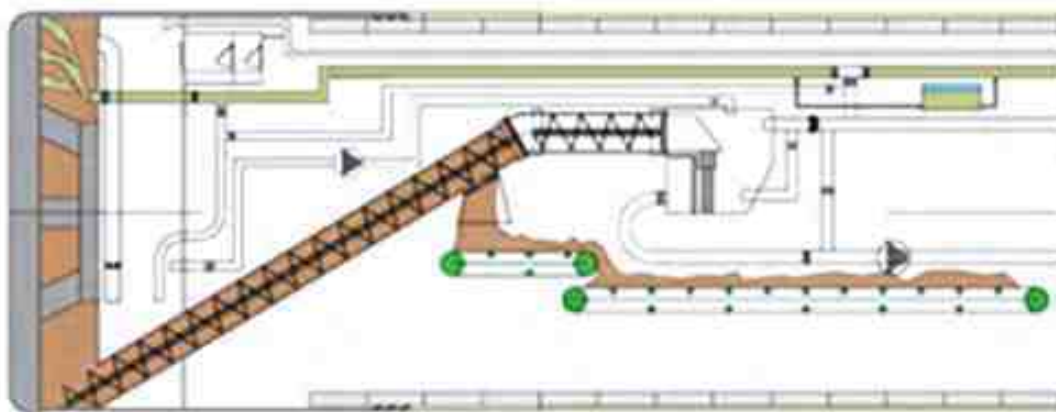


Рис. 1-26. Режим грунтопригруза вместе с гидропригрузом

Щит в этом режиме ничем не отличается от обычного щита с грунто- или гидропригрузом, регулирующего давление на воздушной подушке. Кабина экскаватора заполнена глинистым раствором, смешанным со шлаком. Кабина регулирования давления автоматически регулирует давление с помощью сжатого воздуха, и шлак выгружается через винтовой конвейер № 1, винтовой конвейер № 2, заднюю гравийную дробилку, коробку регулировки шлака, буровой насос и трубопровод для шлака. Ленточный конвейер не работает.

Режим 3 – обычный режим гидропригруза, как показано на рис. 1-27.

Режим 4 – режим гидропригруза добавлением глинистого раствора, также называется режимом гидропригруза с высокой плотностью, как показано на рис. 1-28. Конструкция щита

в этом режиме основана на обычной конструкции щита с регулированием давления на воздушной подушке, которая увеличивает функцию впрыска глинистого раствора высокой плотности в отсек, чтобы уменьшить потерю проницаемости глинистой воды и быстро обеспечить стабильность забоя. Коробка регулировки шлама уменьшает плотность глинистого раствора в задней части винтового конвейера, чтобы она соответствовала требованиям откачки.

(2) Диапазон геологической адаптации

Теоретически гибридный щит можно использоваться для любых пластов почвы. Но универсальное оборудование не существует, и гибридный щит также имеет некоторые ограничения при строительстве.

Например, использование гибридного щита в пластах твердых пород без давления воды не имеет преимуществ по сравнению с ТБМ с точки зрения экономии, скорости проходки и эксплуатации. Выбор щита является результатом всестороннего анализа и учета геологии, риска, стоимости, продолжительности и охраны окружающей среды.

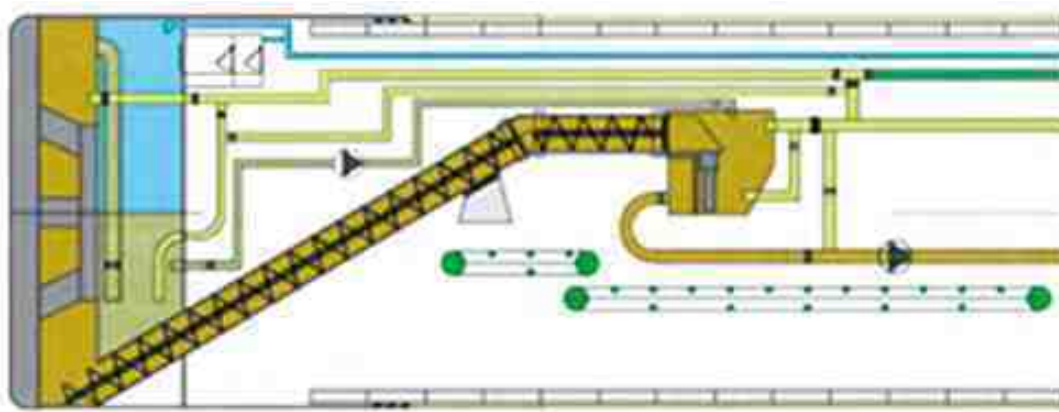


Рис. 1-27. Обычный режим гидropriгруза

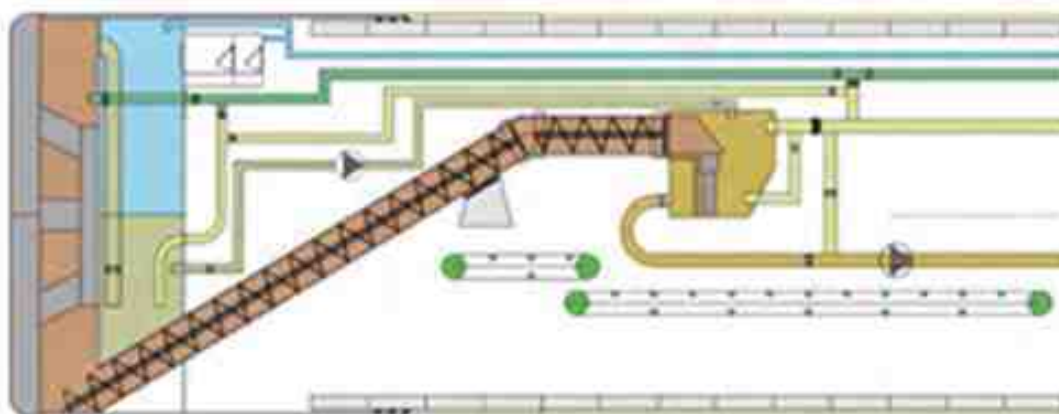


Рис. 1-28. Режим гидropriгруза с высокой плотностью

Технически существует два вида пластов, которые наиболее подходят для гибридных щитов. Первый слой – глинистая и песчаная галька под грунтовыми водами или глинистые и разрушенные скальные образования, которые часто меняются. Такой грунтовой пласт требует, чтобы структура щита регулярно меняла свой режим работы, чтобы адаптироваться к геологическим изменениям. В таком пласте существуют очевидные дефекты, независимо от того,

выбран ли щит с грунтопригрузом с одной функцией или щит с гидропригрузом с одной функцией. Если используется щит с грунтопригрузом, то, конечно, не возникнет проблем с эксплуатацией в мягком слое, но возникнут серьезные проблемы с винтовым конвейером, извергающим песчано-галечный пласт или разрушенный скальный пласт; если используется щит с гидропригрузом, то не возникнет проблем в песчано-галечном пласте или разрушенном скальном пласте, но будут серьезные трудности с глинистой водой, закупоркой трубопровода и трудным разделением глинистой воды и воды в глинистом пласте.

Если используется двухрежимный щит, частое переключение режимов приведет к частым длительным простоям, и часто входить в кабину под давлением будет не безопасно.

Изменение режима гибридного щита (если все оборудование полностью настроено) может быть завершено в течение одного часа и не требует входа в кабину под давлением. Это означает, что, как только геологические условия изменятся, щит может немедленно изменить режим, чтобы адаптироваться к этим изменениям. Щит всегда прокладывает туннели в наиболее подходящем режиме, и эффективность проходки, естественно, значительно повышается.

Второй тип – растворенное горное образование под уровнем грунтовых вод, в то время как покрывающий слой представляет собой мягкую почву, область с высокими требованиями к осадению.

Самый большой риск в таком расплавленном скальном образовании заключается в том, что поверхность выемки нестабильна, потеря воды или глинистого раствора из грунтового отсека вызывает оседание грунта. Если используется гибридный щит, он может стабилизировать поверхность выемки путем закачки бентонита высокой плотности и предотвратить потерю грунтовых вод на поверхности выемки, заблокировав каналы, соединяющие грунт, чтобы предотвратить образование глинистого раствора и избежать возникновения проблем с проседанием грунта. Способ выгрузки шлака также может быть выбран между ленточным конвейером и буровым насосом. Если это в основном глина или крупные камни, а давление воды невелико, вы можете использовать ленточный конвейер для выгрузки шлака; если это в основном песок и камни малой и средней крупности, а давление воды велико, то вы можете использовать буровой насос для выгрузки шлака.

### **1.3. КОМБИНИРОВАННАЯ ПРОХОДЧЕСКАЯ МАШИНА**

Теоретически, проходка двухрежимными щитами или гибридными щитами может быть адаптирована ко всем пластам, но когда большая часть туннеля проходит через устойчивые пласты породы, эффективность проходки двухрежимными щитами или гибридными щитами становится главным противоречием, поэтому объединение преимуществ устойчивой рабочей поверхности щита с преимуществами эффективности проходческого комбайна (ТВМ) при проходке через устойчивые пласты породы приводит к созданию комбинированной проходческой машины.

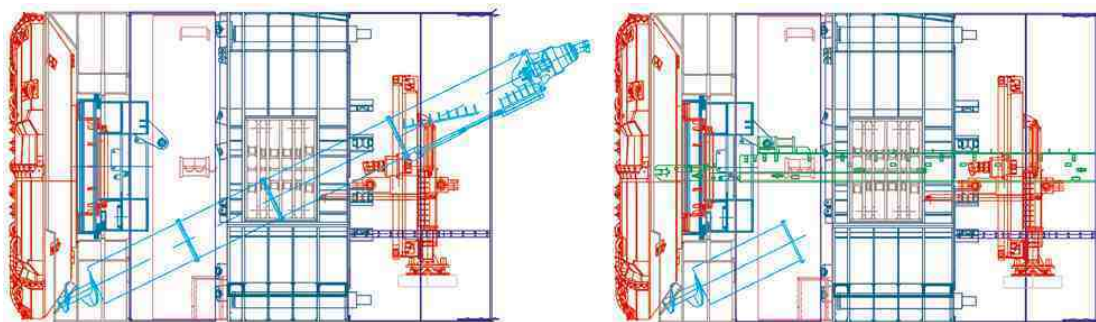
Только когда большинство участков туннеля находятся в горных породах с хорошей самоустойчивостью, небольшое количество секций не может быть использовано для проходки туннелей ТВМ, а использование вспомогательных средств на этих участках затруднительно для укрепления грунта или крайне неэкономично, и только тогда, когда для проходки туннелей используется проходческий щит с грунтопригрузом с возможностью активной стабилизации рабочего забоя, комбинированная проходческая машина подходит.

#### *1) Комбинированная проходческая машина с грунтопригрузом/ТВМ*

##### **(1) Принцип работы**

Комбинированная проходческая машина с грунтопригрузом / ТВМ представляет собой разновидность комбинированной проходческой машины, которая может работать как в режиме выравнивания давления на грунт щитовой проходки (т. е. в режиме ЕРВ), так и в

режиме ТВМ с одним экраном. Конструкция комбинированной проходческой машины с грунтопригрузом показана на *рис. 1-29*.



*Рис. 1-29. Схема конструкции комбинированной проходческой машины с грунтопригрузом*

Если поверхность забоя не может быть самостабилизирована, необходимо использовать режим защиты экранирования ЕРВ для проходки туннелей. В настоящее время устройство выгрузки шлака использует нижний винтовой конвейер. Когда поверхность забоя может самостабилизироваться, для проходки туннелей используется режим ТВМ, в это время устройство для выгрузки шлака использует центральный ленточный конвейер. Комбинированная проходческая машина может заранее изменять режим движения и метод выгрузки шлака при изменении геологии и гидрологии пласта, чтобы уменьшить влияние на опорную конструкцию, а также снизить риски проекта и сократить период строительства.

Комбинированная проходческая машина с грунтопригрузом оснащена щитами для выравнивания давления грунта и оборудованием и системами, связанными с ТВМ, такими как центральная система выгрузки шлака с ленточного конвейера, система проскальзывания шлака, система пылеудаления, система гравия из гальки и т. д. из ТВМ, и щит выравнивания давления грунта. В щите с балансом давления грунта имеется система выгрузки шлака с шнековым конвейером, система пены, система синхронного цементирования, система бентонита и т. д.

#### *Режим 1: режим ТВМ с одним щитом*

Комбинированная проходческая машина с грунтопригрузом / ТВМ использует режим ТВМ при движении в твердых и самостабилизирующихся горных породах и скальных образованиях, как показано на *рис. 1-30*. В это время используется центральный ленточный конвейер для выгрузки шлака в принимающей зоне, а проходка туннелей обладает высокой скоростью и низким крутящим моментом для повышения эффективности проходки туннелей и скорости оборудования в твердой горной породе.

При проходке туннелей в режиме ТВМ центральный ленточный конвейер выходит в отсек для почвы из центра главного привода, задняя часть рабочего органа оборудована желобом для шлака, а центр отсека для грунта оборудован желобом для шлака. После того, как фреза разрезает породу, шлак попадает в шлакоотвод через скребок для шлака, а затем попадает в центральный ленточный конвейер через шлакоотвод и после этого транспортируется в заднюю опорную зону с помощью соответствующего ленточного конвейера. На этом этапе в центре рабочего органа проектируется водоструйное поворотное устройство для снижения пыли и температуры.

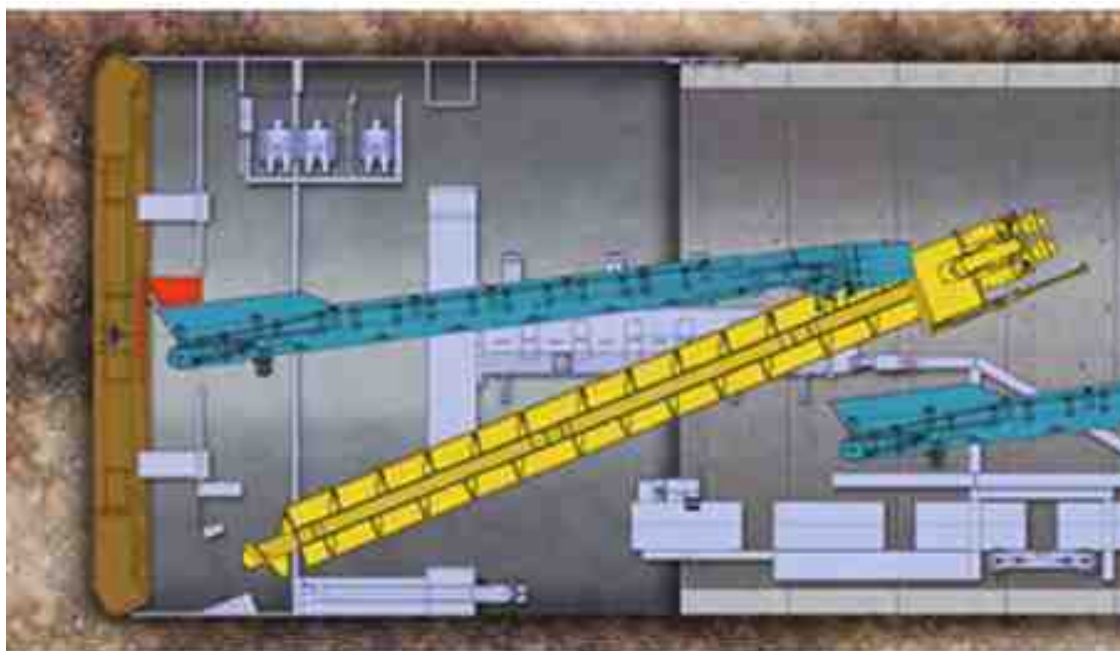
Задняя часть тьюбинга может быть заполнена мелким гравием, а затем цементным раствором (или строительным раствором) и вторичным раствором для увеличения несущей способности грунта. При проходке туннеля в открытом режиме в зоне основной машины много

пыли, поэтому необходимо включить систему пылеудаления для очистки воздуха в зоне основной машины.

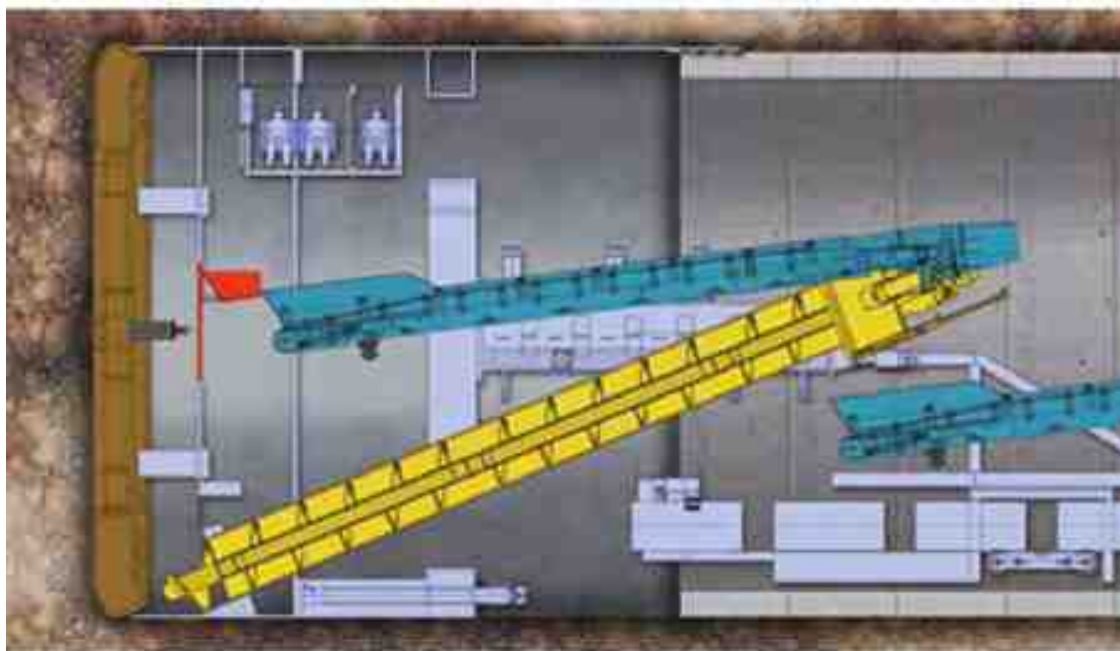
*Режим 2: проходческий щит с грунтотриггером*

Комбинированная проходческая машина ТБМ используется в режиме баланса давления грунта при прокладке тоннеля в неустойчивом грунте или мягком грунте, как показано на рис. 1-31. В этом случае шлак выгружается из нижнего винтового конвейера в зоне основной машины, и оборудование должно копать под давлением, чтобы контролировать оседание грунта, поэтому должны быть активированы пеногенератор, система синхронной цементации и бентонитовая глина.

На центре ведущего привода установлено шарнирное соединение при режиме баланса давления грунта, пена и бентонит поступают в переднюю часть щита через проход роторного соединения и трубы, расположенные на фрезе для улучшения почвы. В нижней части переднего щита установлен винтовой конвейер, где почва формируется в винтовом конвейере и падает через задний люк винтового конвейера в задний поддерживающий ленточный конвейер. Датчики давления почвы установлены на переборке и стволе винтового конвейера для определения давления почвы в люке и винтовом конвейере.



*Рис. 1-30. Режим проходки ТБМ с одним щитом (выгрузка шлака с центрального ленточного конвейера)*



*Рис. 1-31. Режим проходческого щита с грунтопригрузом (разгрузка нижнего винтового конвейера)*

В связи с двумя различными схемами выгрузки шлака в зоне главного двигателя для двух различных режимов проходки, при переключении режимов требуется частичная перестройка рабочего органа с установкой дополнительных салазок для шлака.

(2) Область применения в геологии

Учитывая характеристики комбинированной проходческой машины с грунтопригрузом / ТВМ, оборудование может быть использовано при работе с твердыми породами, различными типами выветрившихся пород, мягкими и твердыми неровными пластами, слоями песка и гальки и мягким грунтом. Данный комбайн в основном используется в районах с относительно высокой долей твердых пород, где мягкие и твердые пласты взаимодействуют друг с другом и где местная сейсмостойчивость.

Несмотря на то, что данная машина может быть применена к вышеупомянутым различным пластам, оборудование имеет следующие характеристики для проходки туннелей в твердых горных породах:

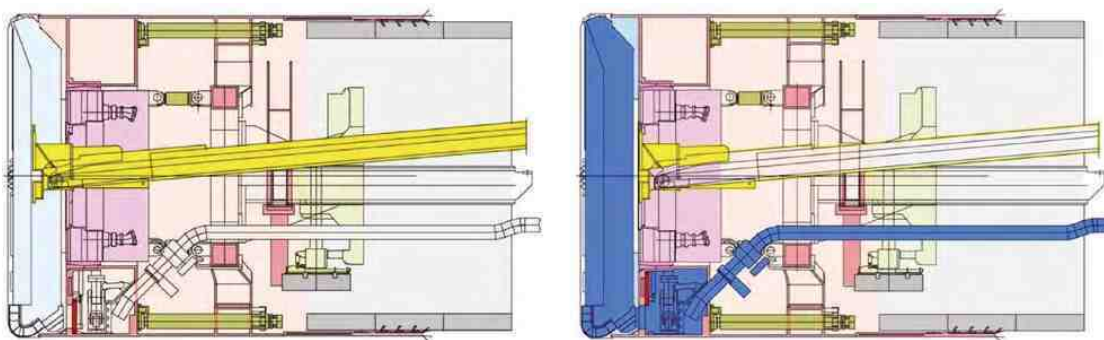
1) Сравнение проходческого щита с грунтопригрузом и системы привода комбинированной проходческой машины / ТВМ. Несмотря на то, что система привода комбинированной проходческой машины / ТВМ оснащена высокой скоростью и высоким крутящим моментом, двухрежимным резцом и т. д., по сравнению с однофункциональным сбалансированным щитом с грунтопригрузом, производительность проходки машины в глинистых, песчаных и булыжных пластах все еще уступает однофункциональному щиту с грунтопригрузом целевой конструкции, например, по предотвращению грязевой корки резца и высокому крутящему моменту для проходки.

По сравнению с ТВМ для твердых пород комбинированные машины для бурения с грунтопригрузом / ТВМ уступают однофункциональным ТВМ по прочности конструкции резца, способу установки инструмента, разрушающей способности инструмента, максимальной скорости привода, а также вибрация главного блока и производительность валков уступают аналогичным показателям однофункционального ТВМ.

Смена режима туннелирования требуется при изменении требований к функции туннелирования. Комбинированные машины для бурения с грунтопригрузом / ТВМ из-за различных функциональных потребностей резцовой головки, улучшенной очистки, сброса шлака и т. д., особенно для двухрежимной защитной конструкции с давлением грунта / ТВМ малого диаметра, смена режима в туннеле является относительно трудоемким процессом. Как правило, предварительная подготовка персонала, материалов и оборудования требует от 2 до 3 недель, и смена режима должно осуществляться в самостабилизирующихся пластах породы.

#### *2) Комбинированная машина с глинистой водой / ТВМ*

Комбинированная машина для проходки туннелей с использованием жидкой глинистой воды / ТВМ может использоваться как в режиме баланса жидкой глинистой воды, так и в режиме однощитовой ТВМ, в которой щит выгружает глинистую воду через грязевую трубу на ленточный конвейер. Комбинированная машина для проходки туннелей с использованием жидкой глинистой воды / ТВМ показана на *рис. 1-32*, которая использовалась при строительстве туннеля через озеро Лост в Неваде и туннеля Хернандес в США.



*Рис. 1-32. Комбинированная машина с глинистой водой / ТВМ*

### **1.4. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ИННОВАЦИИ И РАЗВИТИЕ ПРОХОДЧЕСКИХ ЩИТОВ В КИТАЕ**

Китай начал изучать строительство проходческих щитов и методы щитовой проходки с 1953 года. Оглядываясь назад на историю развития технологии проходческих щитов Китая за период, более чем 60 лет, ее можно разделить на три этапа – период зарождения технологий (1953– 2002 гг.), инновационный период технологий (2003–2008 гг.), период скачка технологий (с 2009 по настоящее время).

#### **1.4.1. Рассвет китайской щитовой технологии**

Период 1953–2002 годов был рассветом щитовой технологии в Китае, когда Китай взял на себя обязательство «строить китайские собственные щиты». В 1953 году в угольной шахте Фусинь на северо-востоке Китая был разработан щит, работающий вручную, что позволило написать историю китайских щитов с нуля.

##### *1) Разработка и применение щита ручной раскопки*

Разработка и применение щитов в Китае началась в 1953 году, на 128 лет позже чем за рубежом.

В 1953 году на угольной шахте Фуксин в Северо-Восточном Китае был построен дренажный туннель диаметром 6 м с использованием прорытого вручную щита и небольших сборных бетонных блоков – первый туннель, построенный с использованием щитового метода в Китае. В феврале 1962 года туннелестроительная компания Шанхайского городского строительного бюро провела экспериментальное исследование щитов в условиях мягкого грунта в Шанхае.

Для проведения буровых испытаний в двух репрезентативных пластах был разработан щит с ручным бурением диаметром 16 м (*рис. 1-33*), в котором использовались атмосферные осадки или давление воздуха для стабилизации пластов ила и мягкой глины. После долгих дебатов и наземных испытаний в качестве обделки туннеля был выбран один слой железобетонных листов труб, соединенных болтами, а в качестве материала для гидроизоляции стыков использовалась эпоксидная смола. При длине проходки туннеля 68 м испытание прошло успешно, и было собрано большое количество данных по щитовому туннелю.

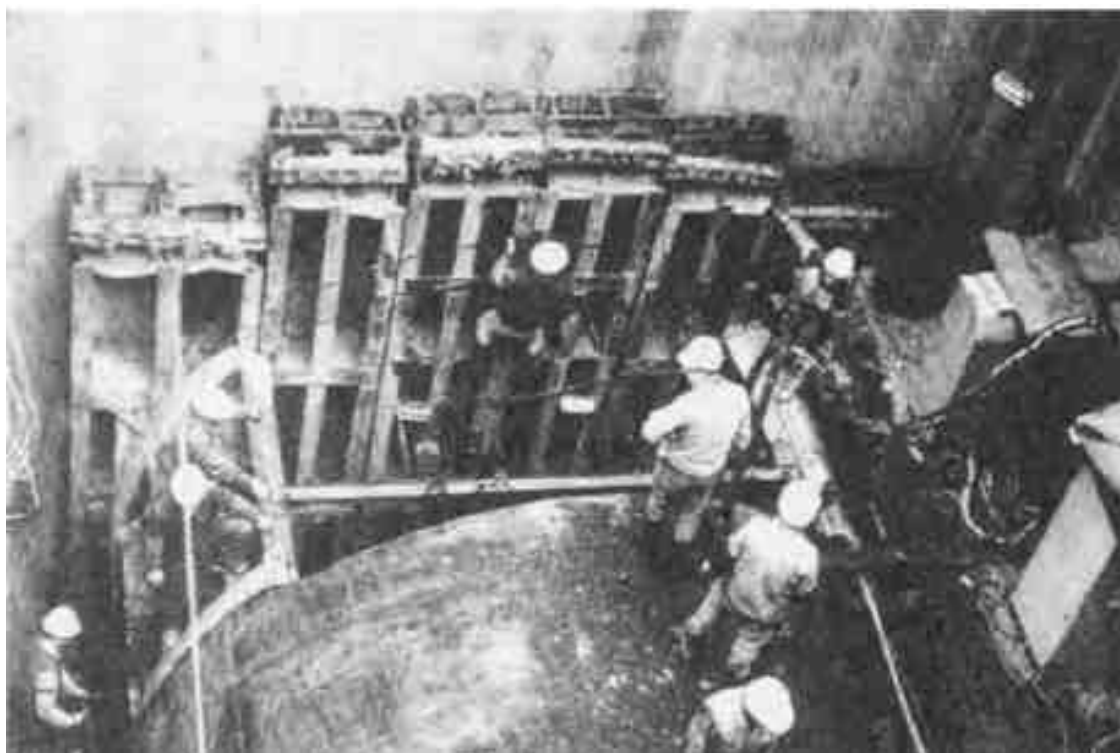
## *2) Разработка и применение решетчатых экструзионных щитов*

В марте 1965 года были введены в эксплуатацию два 8-метровых решетчатых экструзионных щита, разработанных Шанхайским институтом проектирования туннелей и изготовленных Цзяннаньским судостроительным заводом (*рис. 1-34*). Два параллельных туннеля длиной 660 м с максимальным оседанием грунта 10 см были введены в эксплуатацию в 1966 году.

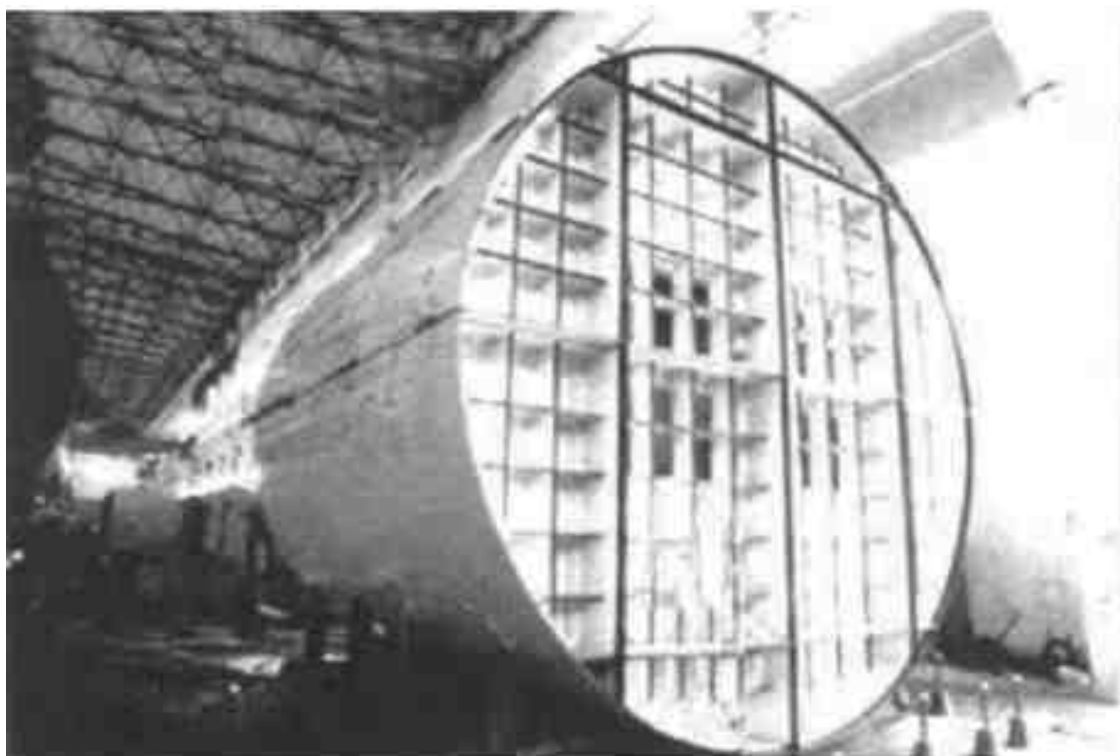
В мае 1966 года был построен первый в Китае подводный автодорожный туннель – главный туннель проекта строительства автодорожного туннеля Шанхай Дапу, пересекающий дорогу, с использованием 22-метрового щита с решетчатой экструзией  $\varnothing 10$  м, разработанного Шанхайским институтом проектирования туннелей и изготовленного Цзяннаньским судостроительным заводом (*рис. 1-35*), дополненного стабилизированной под давлением воздуха поверхностью выемки. Проходка туннеля была успешно выполнена под рекой Хуанпу на глубине 16 м (*рис. 1-36*), общая длина проходки составила 1322 м.

Туннель Дапу был открыт для движения в конце 1970 года. Решетчатый щит, используемый в этом туннеле, был усовершенствован путем преобразования открытого строительства на закрытое.

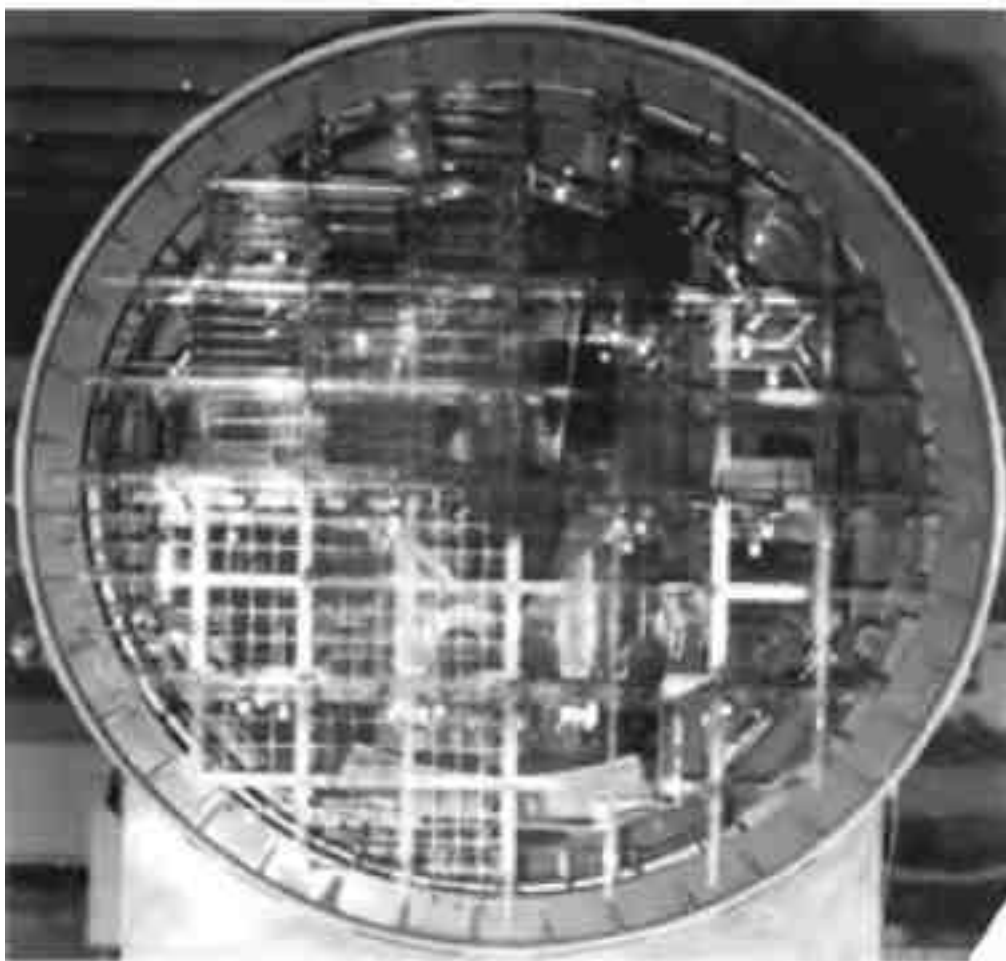
В 1973 году гидромеханизированный решетчатый щит диаметром 6 м и два решетчатых экструзионных щита диаметром 3 м были использованы для строительства туннеля для сброса сточных вод и двух туннелей для отвода воды на главном нефтехимическом заводе Цзиньшань в Шанхае. В 1980 году был построен пробный участок линии 1 Шанхайского метрополитена, и был разработан экструзионный сетчатый щит диаметром 412 м для проходки 1130 м туннеля в заиленной глине через нагнетание глинистой водой и местное давление.



*Рис. 1-33. Выкопанная вручную щитовая проходка, разработанная Шанхайским бюро городского строительства (1962 г.)*



*Рис. 1-34. Решетчатый экструзионный щит,  $\phi$  8 м, построенный Цзяннаньским судостроительным заводом (1965 г.)*



*Рис. 1-35. 22-метровый щит с решетчатой экструзией  $\phi$  10 м, изготовленный Цзянаньским судостроительным заводом (1966 г.)*



*Рис. 1-36. Строительство туннеля на дороге Дапу в Шанхае (1970 г.)*



*Рис. 1-37. Строительство 3-метрового экструзионного решетчатого гидравлического проходческого щита, изготовленного Цзяннаньским судостроительным заводом. Работы гидравлического проходческого щита (1982 г.)*

В 1982 году 1476-метровый главный кольцевой туннель для северной линии Восточно-Яньаньского дорожного перехода на Бунде в Шанхае был построен с использованием 3-метрового экструзионного решетчатого гидравлического проходческого щита, разработанного Шанхайской туннельной компанией и изготовленного Цзяннаньским судостроительным заводом (рис. 1-37). Конструкция щитовая состоит из решетчатой грундной пластинки, поддерживающей экструзию, гидравлической резки поступающего грунта и гидромеханической транспортировки. Щит удерживается 48 гидравлическими домкратами вокруг опорного кольца с максимальной движущей силой 10 800 т (около 106 000 кН).

*3) Разработка и применение режущего проходческого щита*

В 1986 году Китайская железнодорожная туннельная корпорация разработала полусекционный режущий проходческий щит (рис. 1-38), который был успешно использован для строительства обратной линии Пекинского метро Фусингмен.

Полусекционный режущий проходческий щит сочетает в себе «метод щитовой проходки» и «метод скрытой проходки на небольшой глубине», устраняя необходимость в предварительном цементировании с применением небольшой обсадной трубы и осуществляет проходку верхнего полусечения туннеля под защитой щитовой оболочки и хвостового листа щита.

Полусекционный режущий проходческий щит полностью гидравлический и с электронным управлением может самостоятельно продвигаться, поворачиваться и разворачиваться, что позволяет эффективно контролировать оседание поверхности земли и снизить интенсивность труда работников, скорость строительства увеличивается, а среднесуточная глубина проходки составляет 3–4 м.

*4) Разработка и применение проходческого щита с грунтопригрузом*

В декабре 1987 года Шанхайский судостроительный завод изготовил первый в Китае щит с грунтопригрузом диаметром 35 м (рис. 1-39), который был успешно использован Шанхайской туннельной компанией с января по сентябрь 1988 года в проекте строительства кабельного туннеля для перехода через Южный вокзал Шанхая, пересекая слой алевролита на дне реки Хуанпу с длиной скважины 583 м. Он заполнил пробел в производстве щитов с грунтопригрузом в Китае. В начале 1980-х годов технология в целом достигла передового международного уровня, а в 1990 году получила Диплом первой степени Национальной премии за научно-технический прогресс.



*Рис. 1-38. Режущий проходческий щит (1986 г.)*



*Рис. 1-39 Проходческий щит с грунтотригрозом  $\phi$  35 м, изготовленный Шанхайским судостроительным заводом (1987 г.)*

После самостоятельной разработки проходческого щита с гидропригрузом диаметром 35 м и его успешного применения в кабельном туннеле Южного вокзала Шанхая и кабельном туннеле станции Фучжоу, в 1988 году Шанхай самостоятельно разработал новое поколение проходческого щита с гидропригрузом с самым большим диаметром в Китае на тот момент, 64 м (рис. 1-40). Все оборудование для щитов полностью локализовано, а более передовые технологии обработки, сварки, сборки и другие технологии подтверждают факт выхода шанхайской технологии производства щитов на новый уровень.



Рис. 1-40. Шанхайский собственный 64-метровый проходческий щит с гидропригрузом (1988 г.)

Данная машина используется в строительстве туннелей с высокой скоростью строительства и высоким инженерным качеством, что отвечает соответствующим национальным нормам и стандартам. 27 сентября 1990 года Шанхайская научно-техническая комиссия провела совещание по технической оценке в сравнении с международными показателями. Результаты проверки показали, что технические и экономические показатели проектирования, производства и строительства щита достигли передового уровня иностранной аналогичной продукции. Основные технические параметры щита: внешний диаметр 5640 мм, внутренний диаметр хвостовой части щита 5560 мм, зазор в хвосте щита 30 мм, длина основной рамы 6921 мм (плюс винтовой конвейер 9500 мм), общая тяга 35 280 кН, скорость вращения лопастей  $\omega \sim 0.74$  об/мин, крутящий момент 3600 кН·м (максимальный), 2870 кН·м (номинальный).

Проходческий щит с грунтопригрузом длиной 64 м был использован для дренажного туннеля теплоэлектростанции Wujing в Шанхае. Туннель был облицован собранным железобетонным тюбингом с внешним диаметром 5 м и внутренним диаметром 84 м. Когда туннель достиг своего конца, внутреннее оборудование щита было удалено, а оболочка щита осталась в туннеле, с шестью стойками, установленными примерно в 35 м от конца. Водосброс расположен в 60 м выше по течению от Паньцзяган в Пудонге, а дренажный водосброс построен методом вертикального подъема.

Проходческий щит с грунтопригрузом диаметром 64 м, разработанный в Шанхае, является новым типом щита, разработанным на основе 20-летнего опыта проектирования, производства и строительства щитов в соответствии с международной тенденцией развития щитов, а также является самым большим проходческим щитом с подачей воды в Китае на тот момент. Общая конструкция щита практична, конструкция рабочего органа нова, обладает высокой способностью резать твердый грунт, шнековый конвейер имеет хорошую производительность разгрузки бурового глинистой воды и использует функцию саморегулирования и предварительную регулировку давления на грунт для стабильной и надежной работы.

В щите используется упрощенный процесс разбивки на несколько блоков для изготовления и сборки на месте, что снижает стоимость строительства и сокращает цикл обработки. Оболочка щита изготавливается с помощью процесса полукруглого формования на каркасе шины без необходимости металлообработки, и ее точность соответствует требованиям конструкции. Щит был использован в дренажном туннеле для 6-й фазы расширения тепловой электростанции «Вуцзин». 655 м туннеля было проложено во время строительства, включая 326 м темно-зеленого субглинистого слоя твердой почвы, который показал хорошую проходку, хороший баланс давления почвы и минимальное нарушение окружающих слоев почвы, эффективно контролируя оседание грунта и защищая прилегающий угольный терминал от ударов.

В 1990 году была начата прокладка всей 1-й линии Шанхайского метрополитена, и для туннеля с интервалом 18 км было использовано семь сбалансированных щитовых конструкций диаметром 34 м (*рис. 1-41*), которые были изготовлены совместно FCB, Шанхайской туннельной компанией, Шанхайским институтом проектирования туннелей и судостроительным заводом Худун. Каждый щит бурится на протяжении 200 м в месяц, а осадка грунта контролируется в пределах от + 1 до – 3 см.

В 1995 году началась проходка 24, 12-километрового промежуточного туннеля 2-й линии Шанхайского метрополитена, в котором снова использовались 7 оригинальных проходческих щитов с грунтопригрузом и 2 грунтопригрузных щита, импортированных французской компанией FMT, вместе с 34-метровым грунтопригрузным щитом, совместно изготовленным французской компанией FCB, Шанхайской туннельной компанией, Шанхайским институтом проектирования туннелей и судостроительным заводом Худун (*рис. 1-42*). Для строительства 2-й линии было использовано в общей сложности 10 щитов с грунтопригрузом.



Рис. 1-41. 34-метровый щит, изготовленный совместно с судостроительным заводом Худун и FCB (Франция). Проходческий щит с грунтопригрузом «Дружба» (1990 г.)



Рис. 1-42. 34-метровый щит, построенный совместно с судостроительным заводом Худун и FCB (Франция). Проходческий щит с грунтопригрузом «Введение в эксплуатацию» (1995 г.)

#### 1.4.2. Инновационный период в китайской щитовой технологии

Период 2002–2008 гг. стал инновационным для щитовой технологии Китая, поскольку Министерство науки и техники включило разработку щитовой технологии в государственный план исследований и развития высоких технологий (государственный план «863»), в то же время независимые исследования и разработки щита официально вступили в стадию внедрения. В этот период Китай стремился «сделать лучший щит в Китае», совершив исторический прорыв в развитии китайских щитов.

##### 1) Общие сведения о государственном плане «863»

Ключевые темы исследований государственного плана «863» в области щитовой технологии представлены в таблице 1-1.

Таблица 1-1. Национальная программа «863» об исследованиях щитовой технологии

| №  | Наименование работ                                                                                                             | Ответственный                                  | Целевое финансирование (юаней) | Начало и окончание работ           |
|----|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------|--------------------------------|------------------------------------|
| 1  | Исследование и проектирование полносекционной туннелепроходческой машины $\varnothing$ 3 м                                     | Китайская корпорация железнодорожных туннелей  | 1 000 000                      | Август 2002 г. – июль 2003 г.      |
| 2  | Исследование ключевых технологий рабочего органа щитовой проходческой машины и системы гидравлического привода и их применение | Китайская корпорация железнодорожных туннелей  | 7 500 000                      | Январь 2003 г. – декабрь 2004 г.   |
| 3  | Исследование и применение ключевой технологии щитовой резки и системы измерения и контроля для песчано-гравийных пластов       | Китайская корпорация железнодорожных туннелей  | 6 500 000                      | Июль 2005 г. – сентябрь 2006 г.    |
| 4  | Строительство проходческого щита с гидропригрузом большого диаметра                                                            | Китайская корпорация железнодорожных туннелей  | 7 000 000                      | Июль 2005 г. – декабрь 2006 г.     |
| 5  | Проектирование и изготовление коренного подшипника проходческого щита с грунтопригрузом                                        | Компания по производству подшипников ООО «LYC» | 3 620 000                      | Август 2007 г. – август 2010 г.    |
| 6  | Проектирование и изготовление редуктора большой мощности проходческого щита с грунтопригрузом                                  | ООО механизмов Чжунсинь                        | 3 400 000                      | Октябрь 2007 г. – август 2010 г.   |
| 7  | Разработка и изготовление сверхмощного гидравлического насоса в проходческом щите с грунтопригрузом                            | Гидравлический завод Гуйян Лиюань              | 3 600 000                      | Октябрь 2007 г. – август 2010 г.   |
| 8  | Интегрированная испытательная платформа для проходческих машин                                                                 | Шэньянский завод тяжелого машиностроения       | 7 000 000                      | Октябрь 2007 г. – август 2010 г.   |
| 9  | Разработка прототипа проходческого щита комбинированного типа                                                                  | Китайская корпорация железнодорожных туннелей  | 9 000 000                      | Октябрь 2007 г. – сентябрь 2009 г. |
| 10 | Разработка прототипа проходческого щита с гидропригрузом большого диаметра                                                     | Шанхайская туннельная компания                 | 9 570 000                      | Октябрь 2007 г. – август 2010 г.   |
| 11 | Общие технологии для прокладки полнопроходческих тоннелей                                                                      | Чжэцзянский университет                        | 3 849 000                      | Январь 2012 г. – декабрь 2015 г.   |

|    |                                                                                                      |                                                                  |            |                                  |
|----|------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|------------|----------------------------------|
| 12 | Исследование и применение ключевых технологий проходческого щита для твердых пород большого диаметра | Акционерная компания с ограниченной ответственностью «КЖД-строй» | 4 985 000  | Январь 2012 г. – декабрь 2015 г. |
| 13 | Исследование и применение ключевой технологии щита сверхбольшого диаметра с гидropriгрузом           | Китайская корпорация железнодорожных туннелей                    | 16 220 000 | Январь 2014 г. – декабрь 2017 г. |

## 2) *Исследование и проектирование проходческих щитов с грунтопригрузом*

В августе 2002 года Министерство науки и техники включило проект «Исследование и проектирование полносекционной туннелепроходческой машины диаметром 3 м» в государственный план исследований и развития высоких технологий (план «863»). В результате открытого тендера проект возглавила Китайская корпорация железнодорожных туннелей совместно с Чжэцзянским университетом, Лоянским технологическим институтом, Китайской первой корпорацией тяжелого машиностроения, Юго-западным университетом Цзяотун и другими соответствующими техническими подразделениями в Китае для формирования технологического альянса по проведению технических работ проходческого щита с грунтопригрузом диаметром 3 м.

Под руководством государственного плана «863» были завершены исследования и проектирование структуры основной части, гидравлической системы передачи, электрической системы и системы опорной части проходческого щита с грунтопригрузом диаметром 3 м.

Завершены исследования и проектирование инструментов для системы щита, разработка и производство добавок для пены щита и смазки для герметизации хвостовой части щита. В ходе исследований были подготовлены три книги проектной документации для главного двигателя, одна книга проектной документации для винтового конвейера и одна книга проектной документации для тюбинга; завершены пять книг проектных чертежей для основной машины, одна книга проектных чертежей для тюбинга, одна книга проектных чертежей для винтового конвейера, три книги проектных чертежей для последующей сборки и одна книга проектных чертежей гидравлической системы, всего 16 книг.

## 3) *Разработка и применение рецзовой головки проходческого щита и гидравлического привода*

В конце 2002 года была изучена технология совместного применения гидравлической движительной системы щита и гидравлической системы гидропривода, оптимизация проектирования движительной гидравлической системы щита была осуществлена путем контроля нагрузкой, постоянного контроля мощности гидравлического насоса, всеобщим подбором мощностей и других технологий, также были проведены показательные работы.

15 июля 2004 года разработанные резец, рецзовая головка (рис. 1-43) и гидравлическая система были успешно использованы при промышленных испытаниях второй линии Шанхайского метрополитена, достигнув непрерывной проходки 2650 м, со средней месячной проходкой 331 м и максимальной месячной проходкой 470 м, что соответствовало показателям, требуемым проектом.

26 марта 2005 года был успешно завершён щитовой тоннель для западного продолжения второй линии Шанхайского метрополитена, что ознаменовало собой значительное достижение государственного плана «863» возглавляемое Китайской корпорацией железнодорожных туннелей в области разработки и применения режущего инструмента рецзовой головки и гидравлических приводов.

## 4) *Первый в Китае проходческий щит с грунтопригрузом в метро с независимыми правами интеллектуальной собственности*

В октябре 2004 года первый в Китае проходческий щит с грунтопригрузом с полностью независимыми правами интеллектуальной собственности прототип «Совершенный» (рис. 1-44) начал проходку туннеля в продолжении второй шанхайской линии метро с западной стороны, нарушив господство «иностранного щита» и положив конец истории китайских щитов, долгое время полагавшихся на иностранные бренды.



*Рис. 1-43. Китайская железнодорожная компания возглавляет разработку резцовой головки проходческого щита*



*Рис. 1-44. Проходческий щит с грунтопригрузом с полностью независимыми правами интеллектуальной собственности «Совершенный».*

«Совершенный» проходческий щит с грунтопригрузом в метро – это первый полностью самостоятельно разработанный отечественный щит, разработанный Шанхайская туннельная компания на основе государственного плана «863» десятой пятилетки, который разработан независимо, имеет независимые права интеллектуальной собственности и относится к «Национальной передовой технологии роботов в области производства и автоматизации 863». Это шедевр научных и технологических инноваций в китайском подземном туннельном оборудовании. Внешний диаметр щита составляет 6.34 м, максимальная общая тяга – 35 200 кН, скорость движения – 6 см/мин.

Принцип его проектирования – стремление к высокой надежности, применимости, ремонтпригодности и долгому сроку службы. Благодаря кропотливым техническим исследованиям были внесены технические новшества в следующие шесть систем:

(1) Система привода резцовой головки: в основных компонентах используются самые передовые в мире вспомогательные компоненты для обеспечения надежности и стабильности работы щитовой проходческой машины, срок службы которой составляет более 10 000 часов.

(2) Движительная система: уникальная конструкция движительной структуры гидравлического цилиндра, улучшает силовое состояние тубинга, которое может быть реализовано в соответствии с условиями строительства, зональное управление, бесступенчатое регулирование скорости повышает эффективность работы.

(3) Система сборки: самостоятельно разработанная машина для сборки с дистанционным управлением для повышения интенсивности работы операторов.

(4) Синхронная система управления цементированием: самостоятельно разработанный шламовый насос плунжерного типа, полученная система управления цементированием достигает технического уровня международных аналогичных продуктов.

(5) Система уплотнения хвостовой части щита: самостоятельно разработанное устройство уплотнения хвостовой части щита и распределитель смазки, выбран высококачественный насос для смазочных масел хвостовой части щита, производительность уплотнения хвостовой части щита достигла первоклассного международного уровня.

(6) Автоматическая система управления: самая передовая технология ПЛК серии Q используется для разработки автоматической системы управления, которая имеет одну ведущую станцию и три ведомые станции.

Благодаря инновациям этих ключевых технологий, основные технические показатели оборудования достигли передового уровня аналогичных щитовых конструкций за рубежом, получено более 30 прав интеллектуальной собственности. В октябре 2004 года щит «Совершенный» был использован при строительстве туннеля на участке Губэй Роуд-парк Чжуншань второй линии Шанхайского метрополитена с западной стороны.

Первая выработка была завершена 28 июня 2005 года, установив рекорд по проходке 38.4 м в день (сама быстрая выработка составляла 31.2 м в день для импортных щитов) и 566.4 м в месяц (531 м в месяц для импортных щитов) для отечественных щитов метро, безопасно пересекая многие сооружения с высокими требованиями к защите, такие как надземная внутренняя кольцевая дорога, надземная линия легкорельсового транспорта первой очереди линии Жемчужной реки, защитный канал для людей и водопропускная труба для сточных вод.

В 2006 году было заказано 22 единицы проходческого щита, и данные щиты были применены при строительстве проектов метро в Шанхае, Чжэнчжоу, Ханчжоу, Нанкине и Ухане. В том же году проходческий щит был включен в серию «Национальный новый ключевой продукт» и «Шанхайский новый ключевой продукт», а также получил Первую премию национального научно-технического прогресса.

Исследования и разработки отечественного щита метро были высоко оценены руководителями всех уровней, что значительно ускорило процесс индустриализации китайского щита и реализовало первоначальную цель государственного плана «863» – блокировать иностранные бренды национальным брендом.

*5) Исследование ключевой технологии строительства щитов в песчано-гравийных пластах*

Основываясь на государственном плане «863», Китайская корпорация железнодорожных туннелей еще больше расширила сферу исследований на основе исследования ключевой технологии проходческого щита с грунтопригрузом для мягкого грунта в Шанхае, взяв в качестве проекта четвертую линию пекинского метрополитена совместно с Шанхайской туннельной компанией, Шанхайским исследовательским центром по проектированию и тестированию проходческих щитов, Чжэцзянским университетом и Лоянской компанией по разработке технологий для проведения исследований технологии рабочего органа фрезы, подходящего для сложных песчано-гравийных образований.

В результате испытаний с имитацией бурения была разработана режущая система с комбинированной фрезерной головкой с независимыми правами интеллектуальной собственности и устройство обнаружения абразивного износа, а также система дистанционного измерения и управления щитом в реальном времени для удовлетворения требований безопасного и эффективного строительства щита в сложных пластах с взаимодействием песчаного грунта, гальки и гравийной породы.

В декабре 2005 года проходческий щит с грунтопригрузом (рис. 1-45), разработанный Китайской железнодорожной корпорацией, был успешно использован в проекте «Линия № 4 Пекинского метрополитена, партия 19, на интервале Летний дворец – Юаньминъюань».

*6) Технология ферментированного гидролиза и абсорбирования проходческого щита с грунтопригрузом большого диаметра*

Для того, чтобы сократить разрыв с международным уровнем разработки и технологии производства проходческого щита с гидропригрузом в июле 2005 года Министерство науки и технологий Китайской Народной Республики включило исследование проходческого щита с гидропригрузом в государственный план «863» и инициировало специальный проект по ферментированному гидролизу, абсорбции и проектированию проходческих щитов с гидропригрузом большого диаметра. Были получены следующие результаты:

(1) На основе зарубежной технологии ферментативного гидролиза и абсорбирования проходческого щита с гидропригрузом большого диаметра, опираясь на проект «Желтый переход» Центральной линии водовода Юг-Север I фазы, были проведены исследования по проектированию и производству системы проходки проходческого щита с гидропригрузом и тьюбинга, была завершена разработка чертежей общего проекта проходческого щита с гидропригрузом диаметром 9 м, электрического управления, водно-шламовой системы и др. Инновации в водно-шламовой системе были заявлены на национальный патент на изобретение (заявка на патент № 200610025637.1).

(2) В Уханьском туннеле возле реки Янцзы были применены ферментативный гидролиз и абсорбирование рабочего органа проходческого щита с гидропригрузом диаметром 38 м и в соответствии с конкретными геологическими условиями проекта «Желтого перехода» Центральной линии водовода Юг-Север I фазы, были проведены исследования ключевых технологий, таких как структурная конструкция грязе- и водозащитного отвала, система обнаружения предельного износа отвала и уплотнение главного привода, также был завершен проект 9-метрового грязе- и водозащитного отвала, и был достигнут прогресс в оптимизации проекта.

(3) Испытательная платформа для моделирования системы управления щитом диаметром 5 м (рис. 1-46) была разработана с использованием независимых прав интеллектуальной собственности. На «Испытательный стенд системы управления щитом» была подана заявка на получение патента на национальное изобретение (заявка на патент № 200610160040.8). Успешная разработка испытательного стенда системы управления щитом заложила основу для разработки щита.



*Рис. 1-45. Резцовая головка для гравийнослоистого пласта, разработанная Китайской железнодорожной корпорацией*



*Рис. 1-46. Испытательная платформа для моделирования системы управления щитом гидropriгруза, разработанная Китайской железнодорожной корпорацией*

*7) Разработка и применение комбинированного проходческого щита с грунтопригрузом*

Китайские разработчики и производители щитов давно мечтали о создании комбинированного щита, способного одновременно бурить в различных геологических условиях, таких как мягкий грунт, выветрившаяся порода, твердые и мягкие пласты, песок и галечные пласты. 26 апреля 2008 года, опираясь на государственный план «863», Китайская корпорация железнодорожных туннелей (предшественник Китайской компании по железнодорожному инженерному оборудованию) возглавила разработку комбинированного щита – «Китайская железная дорога № 1» (рис. 1-47), который был разработан при участии Чжэцзянского университета, Хуачжунского университета науки и технологии и Тяньцзиньского университета (рис. 1-48), успешно реализовал мечту совершить исторический скачок от «создания китайского собственного щита» к «созданию лучшего щита в Китае», став первым в Китае композитным щитом с независимыми правами интеллектуальной собственности.

Диаметр щита составляет 6.4 м, максимальная скорость движения – 80 мм/мин, максимальная сила тяги – 32 000 кН, тяга гидроцилиндра – 989 кН, общая тяга – 31 650 кН, мощность фрезы 630 кВт, крутящий момент 4377 кН·м, момент отрыва 5225 кН·м. Данный щит совершил прорыв в разработке адаптивности инструмента, технологии управления распределенной системой ввода/ вывода, технологии системы улучшения шлака и других ключевых технологий, таких как технология проектирования и интеграции комбинированного щита, технология проектирования тубинга с шестью степенями свободы, технология проектирования оптимизации структуры винтового конвейера, технология проектирования системы безопасности с давлением в кабине, технология проектирования композитной системы улучшения шлака и т.д. и выиграл три национальных патента на изобретение и восемь патентов на

полезную модель, 3 национальных патента на изобретение, 8 патентов на полезную модель, а также авторское право на программное обеспечение.

«Китайская железная дорога № 1» была успешно использована для прокладки щитового туннеля между станциями Инкоу и Хэпин третьей линии Тяньцзиньского метрополитена (рис. 1-49), беспрепятственно пересекая сложный и оживленный городской район со множеством старых достопримечательностей, таких как старая резиденция Чжан Сюэяна, «Дом фарфора», старая резиденция Фань Жучжая, Главное телеграфное бюро Тяньцзиня, резиденция Ляонин, компания по производству мелкой соли, здание Бохай и т. д. Максимальная скорость проходки достигала 18 м/сutki во время строительства.



Рис. 1-47. Церемония доставки щита «Китайская железная дорога № 1»



Рис. 1-48. Запуск щита «Китайская железная дорога № 1»

18 июля 2009 года эксперты, организованные Департаментом науки и техники провинции Хэнань, провели оценку результатов работ и пришли к следующему выводу: «Результаты достигли международного передового уровня и международного ведущего уровня в развитии комбинированной дисковой фрезы и технологии синхронного впрыска охлаждающей жидкости и проект имеет большие экономические, социальные и экологические преимущества». Разработка «Китайская железная дорога № 1» заполнила пробел в области комбинированного щита в Китае, нарушив монополию иностранных технологий, открыв новую главу независимых исследований и разработок, проектирования, производства и применения китайского щита в строительстве, сделав первый решающий шаг к индустриализации щита в Китае и заложив основу для реализации программы «Сделано в Китае» и китайской мечты о великой державе. В 2011 году это достижение было отмечено Первой премией научно-технического прогресса в провинции Хэнань.

8) Разработка и применение проходческого щита с гидропригрузом большого диаметра

26 декабря 2008 года большой щит с гидропригрузом диаметром 11.22 м (рис. 1-50) был установлен на месте строительства туннеля Шанхайской дороги Дапу, дополнительного проекта к Всемирной выставке, что ознаменовало еще один солидный шаг в индустриализации проходческих щитов с гидропригрузом и очередной прорыв в технологии проектирования и производства в Шанхае. Это знаменует собой еще один солидный шаг в индустриализации отечественных щитов и является очередным прорывом в области дизайна и технологии производства щитов для шанхайского туннеля после массового производства щита «Совершенный» с полным независимым правом интеллектуальной собственности.



Рис. 1-49. Завершена третья линия метро Инхэ в Тяньцзине в рамках проекта «Китайская железная дорога № 1»



*Рис. 1-50. Завершение изготовления проходческого щита с гидропригрузом большого диаметра*

Проходческий щит с гидропригрузом – это специальная машина и оборудование, используемое при прокладке подземных туннелей, которое использует теорию водно-шламового баланса для контроля баланса между давлением грунта в забое котлована и давлением воды и глинистой воды в камере щита, объединяя механику, электричество, гидравлику и управление.

В августе 2007 года Министерство науки и техники Китайской Народной Республики учредило проект по разработке ключевых технологий и прототипов для крупномасштабных проходческих щитов с гидропригрузом в рамках государственного плана «863» 11-й пятилетки. Используя опыт, полученный от щита «Совершенный», Шанхайская туннельная компания совместно с Чжэцзянским университетом и Китайской корпорацией железнодорожных туннелей успешно разработала сбалансированный проходческий щит с гидропригрузом большого диаметра с полным независимым правом интеллектуальной собственности.

Щит совершил значительный прорыв в основных технологиях, таких как синхронная система цементирования, машина для сборки тубинга, система подачи воды и глинистой воды, электрическая система управления, а также добавил эргономичный дизайн, что делает щит более надежным, долговечным, стабильным и простым в эксплуатации, а также имеет хорошие показатели стоимости и отличное постпродажное обслуживание. На практике колебания давления глинистой воды и воды успешно контролировались в пределах 0.01 МПа, что было лучше международного стандарта того времени, обеспечивая стабильность поверхности котлована в процессе щитовой проходки и удовлетворяя особым требованиям по защите окружающей среды.

Благодаря исследованиям, ключевые технологии оборудования для прокладки проходческих щитов большого диаметра с гидропригрузом внесли значительные инновации в испытательную платформу для моделирования проходки щита, ящик для грунта для моделирования проходки щита, машину для хранения и транспортировки частей щита, машину для сборки частей щита с шестью степенями свободы, приемное устройство, устройство для уплотнения дверей входной и выходной полости, метод выбора коррекции отклонения частей туннельного тубинга, систему измерения отношения проходки щита в реальном времени и т. д.

Было выдано 12 национальных патентов на изобретения и один патент на полезную модель. Компания разработала 4 основных программных обеспечения, таких как программное обеспечение для сбора общих данных щита V1.0, программное обеспечение для визуализации и анализа информации о конструкции щита V1.0, система автоматического измерения проходки щита V1.0, система выбора коррекции прогиба куска трубы щита V1.0 и т. д., зарегистрировала авторские права на 4 программных обеспечения и заняла первое место в номинации «Золотая награда» на Китайской международной промышленной выставке 2010 года.

В качестве знакового достижения независимых инноваций и скачкообразного развития, достижения проходческих щитов большого диаметра с гидропригрузом были успешно отобраны для участия в Национальной выставке основных научно-технических достижений «11-й пятилетки», что ознаменовало собой крупный прорыв в независимых инновациях проходческих щитов большого диаметра с гидропригрузом в Китае и создало еще одну новую главу в области строительства щитов в Китае. Основные инновационные достижения следующие:

(1) Система уплотнения хвостовой части щита: 22 контрольные точки установлены для мониторинга давления смазки в хвостовой части щита в режиме реального времени, обеспечивая безопасность строительства, а также надежное уплотнение хвостовой части щита и экономию расхода смазки.

(2) Синхронизированная система цементирования: автоматический мониторинг потока и давления цементирования в реальном времени, синхронизированный с двигателем. Эффективный контроль оседания грунта и стабилизация формирующегося туннеля.

(3) Машина для сборки тубинга: вакуумные присоски используются для захвата частей труб для повышения безопасности сборочной машины; инновационная конструкция присосок может быть демонтирована для удовлетворения потребностей различных ширин и размеров частей труб с 6 степенями свободы управления для повышения качества частей труб.

(4) Система очистки и подачи глинистой воды и воды: научная конфигурация комплекта насосов для подачи грязи и воды, интеллектуальное управление шламовым насосом с переменной скоростью и комплектом клапанов для контроля глинистой воды и воды.

(5) Программное обеспечение системы управления: оснащена самостоятельно разработанной и созданной системой управления проходческого щита с гидропригрузом.

(6) Электрическая система: предусмотрены два типа коммуникационных сетей – связь через электрические шины и промышленная коммуникация через локальную компьютерную сеть; реализованы сбор, отображение, хранение, анализ и дистанционная передача данных в реальном времени, интуитивно понятная и простая в понимании система; оснащена пультом управления электрической системой с сенсорным экраном, простым и быстрым в управлении.

(7) Самоходная приемная машина: впервые оригинальная рама самоходного приемного локомотива применяется к проходческому щиту с гидропригрузом, чтобы обеспечить стабильное давление воды в разрезе при приемке и значительно улучшить эффективность строительства.

Проект реконструкции туннеля на дороге Дапу, начинающийся от пересечения Южной дороги Чжуншань – Восточной дороги Руйхуэй в Пуси и заканчивающийся на пересечении дороги Яохуа – дороги Чанцин в Пудуне, общей протяженностью 2969 км, расположен на западной стороне первого поперечного туннеля реки Хуанпу, туннеля дороги Дапу. Построенный туннель имеет 2 полосы и вместе с туннелем Дапу Роуд образует двухполосную 4-полосную дорогу, причем двухполосная дорога будет односторонним каналом из Пуси в Пудун, а 2 полосы первоначального туннеля Дапу Роуд – односторонним каналом из Пудуна в Пуси.

Проект предусматривал пересечение реки Хуанпу шириной 700 м, с глубокой вскрышной породой туннеля и высоким давлением подземных вод, что предъявляло чрезвычайно высокие требования к процессу производства и безопасности щита. Кроме того, туннель имеет достаточно малый радиус поворота (радиус поворота 380 м) – около 442 м, что является наименьшим радиусом поворота среди всех туннелей, построенных с использованием большого проходческого щита с гидропригрузом.

В процессе строительства отечественный проходческий щит с гидпригрузом диаметром 22 м была разработана интеллектуальная система управления эксплуатацией для мониторинга и управления в режиме реального времени, успешно преодолевая трудности, связанные с пересечением затопленного участка туннеля дороги Дапу, большого расстояния между рекой Хуанпу и южной канализационной магистралью большого диаметра, а также участка кривой малого радиуса 380 м. Щит успешно преодолел трудности, связанные с пересечением карстового участка туннеля Дапу, большого расстояния между рекой Хуанпу и южной магистралью канализации большого диаметра и участка кривой малого радиуса 380 м, продемонстрировав технические преимущества отечественного щита.

Первый в Китае проходческий щит с гидропригрузом, изготовленный в рамках государственного плана «863», использованный в туннеле Дапу, был настолько эффективен, что в процессе прокладки туннеля «Цзинь Юэ» прошел через старый туннель Дапу с вертикальным зазором всего 4.8 мм, пересек южную магистральную канализационную линию длиной 500 м в средней части реки с максимальным уклоном 4.8%, приземлился в Пукси и прошел через противопаводковую стену порта Рихуэй. После приземления в Пукси он пересек противопаводко-

вую стену порта Риюй и прошел через скопление свайных фундаментов и сложных подземных трубопроводов, достигнув радиуса поворота 380 м на дне реки Хуанпу, установив рекорд по наименьшему радиусу поворота проходческого щита с гидропригрузом в Китае на тот момент.

Среднемесячное продвижение «Цзинь Юэ» составляет 244 м, уровень точности контроля водно-шламового баланса равен 0.01 МПа, интенсивность аварийного отключения составляет всего 3.6%. Кроме того, многие технические показатели, такие как колебание давления, осадка поверхности и осевая точность, опережают зарубежные аналоги, а комплексные показатели по удобству эксплуатации и стабильности достигли передового международного уровня.

9 сентября 2009 года щит «Цзинь Юэ» завершил свою первую работу – плавное открытие дуплексного туннеля шанхайской дороги Дапу, восполнив пробел в китайской технологии проектирования и производства проходческих щитов с гидропригрузом большого диаметра, изменив ситуацию, когда щиты большого диаметра полностью зависели от импорта.

Китайский самостоятельно разработанный и изготовленный проходческий щит с гидропригрузом большого диаметра «Цзинь Юэ» с независимыми правами интеллектуальной собственности успешно реализовал проект по перекладке туннеля шанхайской дороги Дапу (*рис. 1-51*), и с тех пор Китай вошел в число стран с независимыми технологиями проектирования, производства и строительства проходческого щита с гидропригрузом большого диаметра.

#### **1.4.3. Период скачка для китайской щитовой технологии**

С 2009 года Китай взял курс на «создание лучшего щита в мире», а китайские технологии производства щитов выросли из отличных в выдающиеся и вышли на международный уровень. За этот период Китай значительно улучшил свои независимые инновационные возможности и сделал значительный прорыв в ключевых технологиях, разработке экспериментальной платформы и развитии индустрии щитов.

Что касается ключевых технологий, то на основе проекта «Ключевые технологии для независимой разработки и производства щитового оборудования и индустриализации» были применены три ключевые технологии – стабильности, соответствия и координации, сосредоточенные на трех основных международных проблемах строительства щитов, таких как нестабильность, неисправность и отклонение оси (*рис. 1-52*).

Для решения вопроса с нестабильностью была разработана система управления динамическим балансом давления для повышения устойчивости сопряжения и эффективного предотвращения обрушения грунта; для решения проблемы с разрушением был разработан метод проектирования соответствия нагрузки для снижения воздействия нагрузки на оборудование; для исправления отклонения оси была разработана технология прогнозирования и коррекции положения щита для повышения точности оси туннеля.

В рамках разработки экспериментальной платформы был разработан ряд научно-исследовательских приборов и оборудования в области щитовых технологий с независимыми правами интеллектуальной собственности. Были созданы две государственные ключевые лаборатории в области передового производства щитовой техники, включая «Государственную лабораторию щитовой конструкции и туннельной техники» (*рис. 1-53*) и «Государственную лабораторию полнопрофильных туннельных бурильных машин» (*рис. 1-54*).

В щитовой промышленности были достигнуты значительные успехи в индустриализации щитов с грунтопригрузом, щитов с гидропригрузом, профилированных щитов и буровых станков (ТВМ), а китайские производители щитов быстро развиваются, что обусловлено огромным рыночным спросом на щиты в Китае. В настоящее время в Китае около 30 предприятий: Китайская корпорация железнодорожных инженерных оснащений, Китайская корпорация тяжелой промышленности железнодорожного строительства, Корпорация северной тяжелой промышленности, филиал машиностроения Шанхайского АОО строительства туннелей, ООО машиностроения Чжунцзяо Тяньхэ, ООО Промышленности Саньсань провинции

Ляонин, Тяжелая промышленность Саньи, Тяжелая промышленность Чжунсинь, Тяжелая промышленность по судостроению, Тяжелое оснащение Китайского судостроения, Жуйчжэн провинции Цзянсу, Дачжун, Дачи, Гуанчжун, Хуасуйтун г. Пекин, Металлургический завод в столице, Тяжелая промышленность Тяньди, Котельный завод г. Ханчжоу, Завод Худун г. Шанхай, Завод тяжелых машин г. Шанхай, Южная корпорация машин г. Чжиян, Туннель Кайгун провинции Цзянсу, Тяжелая промышленность Кайшэн провинции Анхуй, Жуйань г. Чунцин и другие имеют причастность к обрабатывающей промышленности проходческих щитов.



*Рис. 1-51. Проходческий щит «Цзинь Юэ» успешно реализовал проект по перекладке туннеля шанхайской дороги Дапу*



Рис. 1-52. Ключевые технологические достижения



Рис. 1-53. Государственная лаборатория щитовой конструкции и туннельной техники



*Рис. 1-54. Государственная лаборатория полнопрофильных туннельных бурильных машин*

Среди них наиболее конкурентоспособными являются шесть отличных предприятий по разработке и производству щитов, такие как Китайская корпорация железнодорожных инженерных оснащений, Китайская корпорация тяжелой промышленности железнодорожного строительства, Корпорация северная тяжелой промышленности, филиал машиностроения Шанхайского АО строительства туннелей, ООО Машиностроения Чжунцзяо Тяньхэ, ООО Промышленности Саньсань провинции Ляонин и т. д. Показатели эффективности производимых ими щитов соответствуют или превышают показатели международных аналогов, замещают импорт и экспортируются в Сингапур, Малайзию, Израиль, Индию и другие страны.

## ГЛАВА 2. МЕТОД ЩИТОВОЙ ПРОХОДКИ И ЩИТОВЫЕ ТУННЕЛИ

### 2.1. О ЩИТОВОЙ ПРОХОДКЕ

#### 2.1.1. Базовые понятия о щитовой проходке

Метод щитовой проходки – это один из видов технологии подземного землеройного туннельного строительства, при котором прохождение под землей осуществляется с помощью специальной конструкции под названием «щит», который, предотвращая обвал и создавая стабильную поверхность забоя, одновременно производит внутри конструкции безопасную выемку грунта и облицовку внутренних стенок шахты, тем самым формируя готовый туннель.

Согласно этому определению, щитовой метод состоит из трех основных элементов: стабилизации поверхности забоя, выкапывания (выемки) грунта и облицовки (обделки) при помощи конструкции – щита. При выкапывании грунта с помощью щита необходимо решить три главных задачи: выбор рабочей режущей поверхности, способа уравнивания давления на рабочую поверхность и выгрузки шлаковой почвы из шахты. При выборе режущей поверхности, в одинаковых конструктивных условиях пласта и режущей головки, принципиальной разницы нет, остается решить вопрос балансировки и удаления шлака. Что касается обделки туннеля: во время продвижения щита в грунтовом пласте, окружающие породы поддерживаются защитной оболочкой корпуса щита и тубингами (сегментами туннельного кольца), таким образом предотвращая обрушение почвы и песчаных масс во время строительства туннеля. Щит закрытого типа с помощью компрессии глины, либо компрессии шламовой жидкости, создает сопротивление давлению земляных пород и давлению воды, тем самым обеспечивая удерживание и стабильность забоя. Щит открытого типа может применяться в случае, если забой является самонесущим, в противном случае требуются дополнительные вспомогательные меры.

Главный принцип щитопроходной технологии – это завершение работ с минимальным, насколько это возможно, колебанием окружающих пород, тем самым максимально снижая воздействие на наземные строения и фундаментные коммуникации.

Первоначально метод щитовой проходки применялся с использованием ручной, либо механической силы при проведении землеройных работ с применением сжатого воздуха для создания устойчивости забоя и выемки грунта. Если окружающие породы были крайне текучими, то для укрепления и предотвращения протечек применялся метод цементирования, при котором в условиях мягких земляных пластов могли проводиться работы закрытого типа.

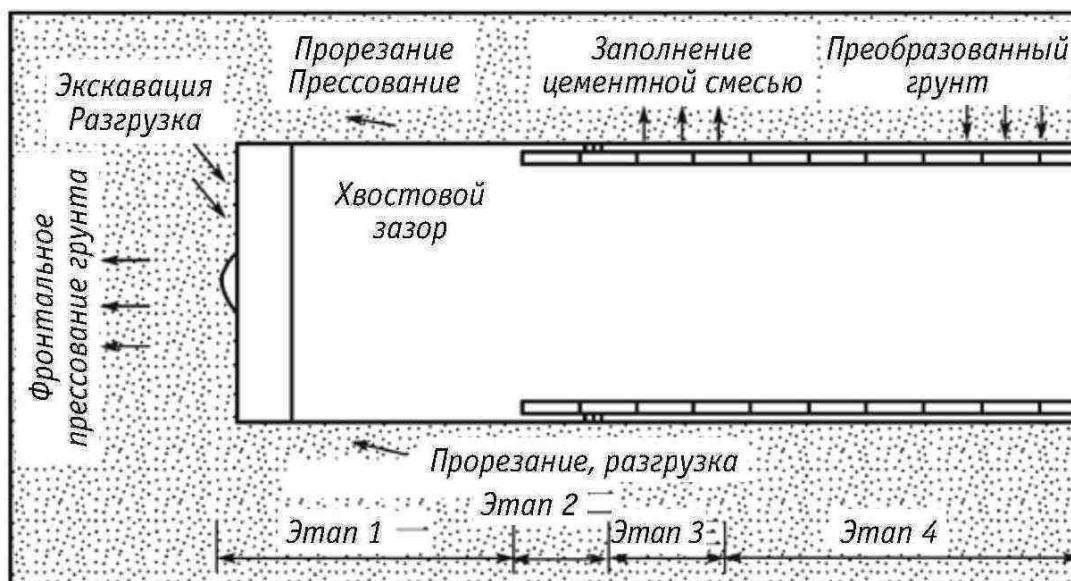
История щитопроходной технологии началась в Великобритании, созрела в Германии и Японии, а затем получила широкое развитие в Китае. С момента появления первой в мире щитопроходной машины в 1825 году, спустя более ста лет научно-исследовательских разработок и эксплуатации, данный метод эволюционировал, и на сегодняшний день широко применяются жидкошламовые проходческие щиты и щиты с компенсацией давления земляных пород. Самым большим преимуществом этих двух видов машин является то, что в процессе проведения землеройных работ предусмотрена возможность стабилизации забоя, таким образом, два из трех основных элементов метода щитовой проходки, а именно стабилизация забоя и выемка грунта, интегрировались в один элемент, тем самым повышая способность адаптироваться к пластам с изменяющимися геологическими условиями, исключая необходимость в проведении дополнительных вспомогательных работ.

### 2.1.2. Механический анализ производственных работ по методу щитовой проходки

Процесс строительства туннеля щитовым методом – это сложный механический процесс, в ходе которого исходная почва подвергается разрушению, дроблению и последующей трансформации. На грунтовые массы забоя воздействует режущее усилие резцов, установленных на рабочем инструменте щита, прокатывающее и трамбуемое усилие, а также удерживающее усилие среды внутри камеры давления. Действующее на грунтовые массы удерживающее усилие снаружи щита почти такое же, как внутри камеры давления. На грунтовые массы в хвостовой зоне щита воздействует сила давления блока синхронной цементации. После того как грунтовые массы подверглись манипуляциям на предыдущих этапах, они будут преобразовываться в течение очень длительного промежутка времени.

В настоящее время наука механического анализа щитопроходческих работ, основываясь на механике сплошной среды, помогла получить множество ценных сведений и получила широкое использование в сфере туннелестроительного проектирования. Однако, вследствие многих неопределенностей в процессе щитовой проходки и неоднородности почвенной среды, между результатами анализа с помощью традиционных методов и фактической ситуацией в ходе строительных работ существует довольно большая разница. Чтобы обеспечить успешное проведение щитопроходческих работ, необходимо объединять данные испытаний и опыт персонала, производящего работы. Вследствие этого необходимо подбирать наиболее оптимальные решения при руководстве работами.

Проходческий щит осуществляет экскавационное продвижение в естественной почвенной массе, формируя туннель, и естественная почва в пределах движения замещается туннельным пространством с облицовочной обделкой. По мере продвижения резцы рабочего органа щита прорезают земельный пласт перед ним, и он посредством выдвигания гидравлических цилиндров, оказывающих давящее усилие на предварительно смонтированную облицовочную обделку, осуществляет движение вперед. При каждом цикле продвижения вперед на ширину одного тюбинга, персонал, оперируя тюбингоукладочной установкой, осуществляет монтаж тюбингов в хвостовой части щита, формируя постоянную опору для туннеля. Во время продвижения вперед зазор между тюбингом и земляным слоем заполняется цементирующей жидкостью, завершая процесс формирования туннеля. В итоге процесс строительства туннеля обычно включает в себя 4 механических этапа (рис. 2-1).



*Рис. 2-1. Четыре этапа туннелестроительных работ щитопроходным методом*

*Этап 1:* резцы рабочего инструмента выкапывают фронтальную почвенную массу, а также с помощью шлаковой земли либо жидкой глинистой воды удерживают окружающие почвенные массы.

*Этап 2:* щит продвигается вперед, при этом внутри щита происходит монтаж облицовочных тубингов.

*Этап 3:* после того как сформируется строительный зазор в хвостовой части щита, снаружи облицовочной обделки происходит заливка цементной суспензии.

*Этап 4:* окружающий земляной слой постепенно твердеет и преобразуется.

Во время вышеперечисленных четырех стадий земляной слой вокруг щита подвергается сдавливанию, разрезанию, сдвиганию, преобразованию и серии прочих воздействий. Строительная практика показывает, что в процессе проходки щита вышеуказанные этапы оказывают довольно большое влияние на окружающие земляные слои.

#### 1. Эскавация и укрепление почвы перед резцовой головкой

Разрезание земляного пласта вращающейся резцовой головкой является первым шагом щитопроходных работ. На этом этапе щит медленно продвигается вперед, а земля перед ним режется вращающейся резцовой головкой и попадает в землеприемный призабойный отсек (в случае жидкошламовой проходки – попадает в шламовый призабойный отсек), затем по шнеку щита (либо по трубопроводу) выводится на поверхность земли. Успешное прохождение данного этапа играет ключевую роль в сохранении стабильности фронтального земляного пласта. На *рис. 2-2* показан силовой анализ воздействия на забой.  $H$  – высота уровня подземных вод,  $C$  – глубина земляного покрова над щитом,  $D$  – диаметр щита,  $P_w$  – давление воды,  $P_s$  – латеральное (боковое) давление,  $P_c$  – давление земляных масс в землеприемном призабойном отсеке (либо давление шламовой жидкости в шламовом призабойном отсеке). Для обеспечения стабильности забоя необходимо обеспечивать достаточное удерживающее усилие.

В процессе продвижения щита вперед картина воздействующих на земляную массу сил достаточно сложная. Сдавливание (экструзия) и разрезание резцами, сдавливание среды в кессонной камере, – это многофакторный динамический процесс. В условиях более-менее стабильной фронтальной почвенной массы, как правило, обсуждается только смещение почвы на открытой части, игнорируя контакт поверхности резцовой головки с фронтальной почвенной массой по всему сечению разрезания. Во время продвижения вперед эффективное удерживание фронтальных земляных масс достигается с помощью установки соответствующего давления в землеприемном призабойном отсеке (либо шламовом отсеке).

#### 2. Формирование и заполнение хвостового зазора

Во время продвижения щита, для обеспечения достаточной поворотной способности, между оболочкой щита и смонтированной обделкой внутри хвостовой части щита, как правило, остается определенный конструктивный зазор. Когда домкрат толкает щит вперед, со смонтированной обделки, располагающейся внутри хвостовой части щита, сдергивается хвостовая защита, и между периферией обделки и окружающей почвой образуется конструктивный зазор, который обычно называют хвостовым зазором.

На *рис. 2-3* показано, как после удаления корпуса щита от обделки туннеля, вследствие образования зазора в хвостовой части, окружающая грунтовая масса теряет опору и приходит в несбалансированное состояние. В результате естественная регуляция возникшей нагрузки может привести к обвалу окружающих грунтовых масс и деформации туннеля. Поэтому хвостовой зазор необходимо заполнить цементной суспензией.

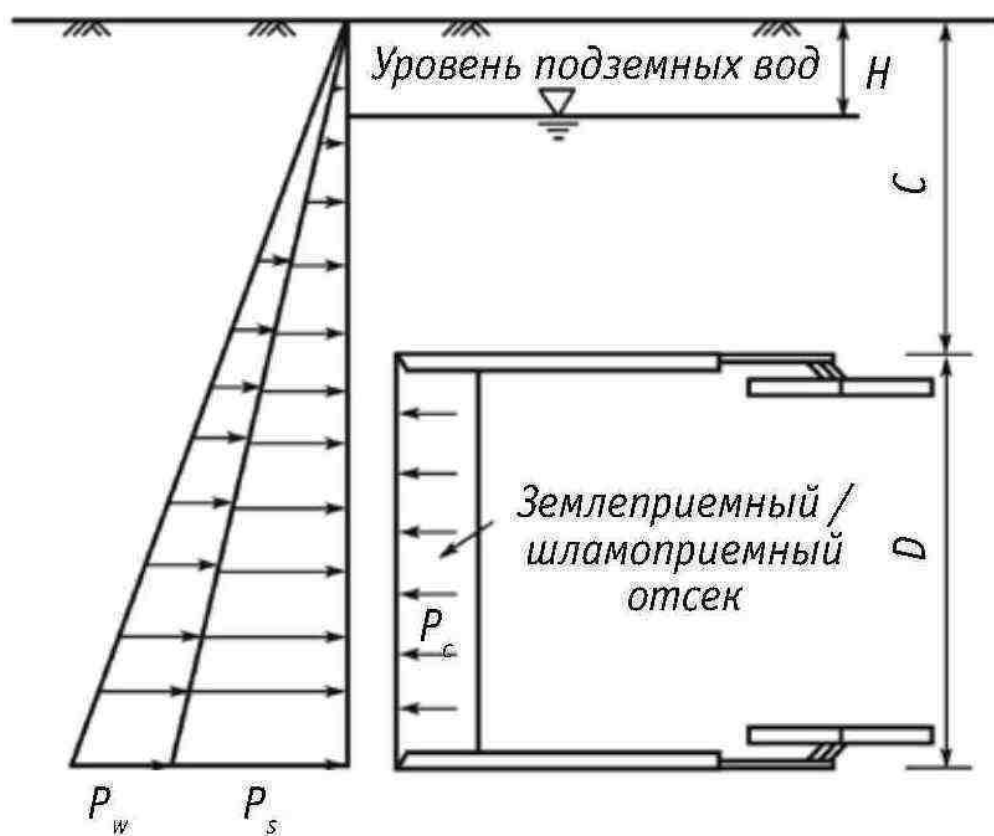


Рис. 2-2. Силовой анализ воздействия на забой



Рис. 2-3. Схема хвостового зазора

После заполнения суспензией образованная при помощи обделки и суспензии структура укрепления служит защитой при сбросе напряжения окружающими грунтовыми массами, тем самым помогая держать под контролем деформацию окружающих пластов и просадку грунта. Технологию заполнения хвостового зазора суспензией обычно подразделяют на два типа: синхронная заливка и застенная заливка. Синхронная заливка означает непрерывную подачу суспензии под давлением с помощью специального трубопровода, расположенного в хвостовой части щита, одновременно с формированием хвостового зазора. Застенная заливка означает заливку суспензии через специальные отверстия в тубингах; такой способ заполнения можно осуществлять и одновременно с продвижением щита вперед, и для вторичной заливки. Синхронный способ заливки является более актуальным при заполнении конструктивного хвостового зазора для щитопроходной технологии, так как достигается более полный контроль смещения окружающих земляных пластов. Данный способ на сегодняшний день является самым распространенным в строительной технологии.

### 3. Консолидация и переустройство (преобразование) окружающих грунтовых слоев

В ходе проведения туннелестроительных работ щитовым методом окружающие грунтовые массы подвергаются нарушению различной степени. С одной стороны, структура грунтовых масс вокруг щита в определенной степени разрушается и реструктуризуется, с другой стороны, меняется водяное давление в поровом пространстве земли. В целях сохранения либо восстановления естественного баланса почвы после нарушения происходит регуляция напря-

жения и деформации грунтовых масс вокруг туннеля; в конечном итоге достигается новый баланс и происходит их переустройство.

Вопросы обстановки сил, действующих на окружающие земляные пласты и вызываемой ими деформации пластов при туннельном строительстве щитовым методом, широко обсуждаемы в инженерной среде, данный вопрос представляется особенно важным, когда при строительстве приходится сталкиваться с расположенными рядом подземными туннельными сооружениями, подвальными помещениями и фундаментом высотных зданий, трубопроводом, коммуникациями и прочими чувствительными к воздействиям сооружениями. Ученые и инженеры по всему миру выдвинули на повестку ряд вопросов из области механики и начали соответствующие исследования в сфере взаимодействия щита и грунта в процессе трех вышеупомянутых этапов проходки в надежде установить закономерности влияния щитопроходных работ на земляные пласты.

### 2.1.3. Принципы механики стабилизации забоя

Эксплуатация грунта – это начало туннелепроходческой работы и самое главное звено. Стабилизация фронтального грунта – ключевой момент для успешного проведения эксплуатации. Обычно балансировка суммы давления фронтального грунта и давления подземных вод достигается регулировкой давления внутри землеприемного отсека (либо давление глинистой воды шламоприемного отсека), с помощью чего достигается стабилизация состояния фронтального грунта и обеспечивается стабильность хода работ.

#### 1) Принципы механики стабилизации забоя

Эксплуатация щита – это процесс, включающий в себя разрезание, смещение, сжатие и укрепление грунта забоя. Картина деформации фронтальных грунтовых масс вследствие воздействия различных сил довольно сложная, на рис. 2-4 показано состояние деформации при воздействии сил.



Рис. 2-4. Состояние деформации при воздействии сил

Находящиеся перед плоскостью режущей головки грунтовые массы подвергаются сдавливающему и разрезающему усилию режущего инструмента щита, при этом может возникать определенная компрессия и переход масс в моментно-пассивное состояние. Однако все грунтовые массы поверхности эксплуатации могут находиться в разных состояниях в зависимости от разных удерживающих сил во время проходки, так как эксплуатационный процесс щита – это отслаивание грунтовых масс забоя от их первоначального расположения с помощью режущего инструмента и перемещение их в землеприемный отсек щита с грунтопригрузом (либо в шламоприемный отсек щита с гидropriгрузом). В процессе прорезания может возникать вре-

менно свободная поверхность, потому что соприкосновение естественной почвы забоя и вырезаемых грунтовых масс не постоянно; на данный момент пока что не удалось найти идеальный способ анализа, кроме создания предположения гипотетически постоянного состояния.

Поэтому в щите обычно установлены датчики давления грунта, но устанавливаются они не на резцовой головке, где измерение давления грунтовой массы перед ним происходило бы напрямую, а размещаются в нескольких местах на перегородках землеприемного либо шламоприемного отсека и измеряют распределение грунтового либо шламового давления в разных точках. В щите с грунтопригрузом опорное (встречное) давление грунта в землеприемном отсеке контролируется посредством регулировки скорости продвижения и скорости шнекового отвода грунта, тем самым достигая стабильности поверхности забоя. В щите с гидropriгрузом шламоприемный отсек постоянно заполнен глинистой водой, и там опорное (встречное) давление контролируется посредством регулировки подачи и отвода количества жидкости, также достигая стабильной поверхности забоя. И в щитах с грунтопригрузом, и в щитах с гидropriгрузом, и в других видах щитов стабильность забоя обеспечивается с помощью использования давления шламовой жидкости либо давления грунта, так предотвращается обрушение забоя, контролируется деформация забоя и, как следствие, предотвращается излишнее нарушение земляных слоев.

## *2) Давление в забое*

При регулировании давления забоя подразумеваются и устанавливаются параметры давления подземных вод, давления земляных масс и давления самого оборудования. В условиях хорошей самостабилизации грунта иногда можно не учитывать давление грунта при установке давления шламовой жидкости, однако, в случае вероятной деформации забоя и проседания фундамента давление грунта все же принимают во внимание. С помощью данных буровой разведки можно с достаточной точностью определить давление грунтовых вод, тем не менее, когда имеет место сезонная изменчивость либо расположение вблизи рек, то на показатели может влиять изменение уровня воды в реке, поэтому также следует учитывать данные факторы при установке давления грунтовых вод.

Давление грунта подразделяется на: активное давление грунта, давление грунта в покое и пассивное давление грунта; установки разнятся и строго соблюдаются в зависимости от требований к ситуативным требованиям забоя. Давление грунта в покое – это идеальное давление без деформации забоя. Активное давление грунта – это предельное давление грунта без обвала в забое, оно является минимальным значением в регулируемых пределах. Пассивное давление грунта – это предельное давление, при котором создается тенденция смещения грунтовых масс забоя в направлении движения проходки, является максимально допустимым значением в регулируемых пределах.

Резервное давление – это давление, компенсирующее потерю во время работы; как правило, область значений находится в пределах 10 ~ 20 кН·м<sup>2</sup> (0.1~0.2 кгс/см<sup>2</sup>).

Регулируемое давление забоя – это давление, рассчитываемое в отношении грунтовых масс сечения забоя в рамках верхнего и нижнего пределов. При учете условий проведения работ регулируемые значения устанавливаются в этом диапазоне. В условиях хорошей самостабилизации грунта берется достаточно низкое значение давления, а в случае, когда деформацию земляных пластов необходимо контролировать в крайне малых пределах, берется достаточно высокое значение давления, а именно:

верхнее предельное значение  $P_{\max}$  = давление грунтовых вод + пассивное давление грунта + резервное давление;

нижнее предельное значение  $P_{\min}$  = давление грунтовых вод + (активное давление, либо давление свободного хода грунта) + резервное давление.

## **2.1.4. Особенности щитопробойной технологии**

При применении щита в туннелепроходческих работах наблюдается высокий уровень автоматизации, экономия рабочей силы, высокая скорость работ, единовременное формирование шахты, благодаря контролируемому оседанию и выпячиванию поверхности грунта, представляется возможным максимально снизить влияние на находящиеся выше строения и подземные сооружения. В случае необходимости прокладывания шахты на большое расстояние и на большой глубине, щитопроходный способ является наиболее экономически целесообразным. Поскольку стоимость производства щита достаточно высока, то щитопроходный метод чаще всего наиболее подходит для строительства особо длинных туннелей. Применение щита для строительства туннеля на короткой дистанции, как правило, считается экономически не выгодным.

*Щитопроходный метод имеет следующие технологические особенности:*

1) Влияние на функционирование городской инфраструктуры и окружающей среды крайне низкое. Кроме необходимости создания определенной площадки вокруг котлована для спуска щита, территория вдоль линии строительства не требует создания рабочей площадки на поверхности земли, не требуется снос и редислокация, поэтому влияние на торговую, транспортную и жилую инфраструктуру является минимальным. Представляется возможным прохождение на глубине через области расположения строений и рек, подземных сооружений и туннельных коммуникаций без какого-либо воздействия на них. Производственные работы, как правило, проходят без применения таких мер как понижение уровня грунтовых вод и т. д., не создают шумовых, вибрационных и прочих строительных помех.

2) Под определенный туннелестроительный объект создается уникальный щит. Несмотря на то, что щиты, в условиях схожих земляных пластов и природных условий, обладают определенными сходными параметрами, тем не менее большинство из них снабжены отличающимся специальным оборудованием, подходящим исключительно для использования на определенном строительном объекте (по так называемому индивидуальному крою). Они разрабатываются, изготавливаются либо модифицируются в соответствии с размером сечения туннеля, условиями глубины пролегания и определяющими факторами окружающих пород. Когда предполагается применять один и тот же щит на других участках либо туннельных проходах, необходимо учитывать размер сечения, механику стабилизации забоя, размер фракции окружающих пород и прочие основополагающие факторы окружающих условий на предмет совпадения, в случае отличий необходимо провести соответствующую модификацию для использования в отличающихся геологических условиях. Производство щита должно происходить с опорой на предполагаемый проект использования и в тесной связи с инженерной геологией данного проекта.

3) Высокие требования к точности работы. В отличие от других видов земляных строительных технологий щитовая проходка крайне требовательна к точности проведения работ. Точность изготовления тубингов примерно такая же, как при изготовлении оборудования, так как нет возможности регулировки плоскости сечения, то к отклонению осевой линии шахты, тубингам и точности установки применяются очень высокие требования.

4) Щитопроходные работы могут проводиться только в одну сторону, потому что внутренний диаметр тубингового кольца меньше внешнего диаметра щита, то после начала работ нет возможности обратного хода. В случае необходимости возвратного движения щита пришлось бы разбирать установленные тубинговые кольца, а это крайне опасно. Также обратное движение щита может вызвать дестабилизацию забоя, поломку хвостовых щеток щита и серию других проблем. Поэтому огромное значение имеет предварительно проделанная работа, ведь при встрече препятствия, поломке режущего инструмента и прочих проблемах, решить их представляется возможным только после проведения особых вспомогательных работ посредством открытия специального люка на разделительной перегородке, через который рабочий

персонал может попасть из кессонной камеры в землеприемный призабойный отсек и устранить неполадку.

### **2.1.5. Преимущества и недостатки метода щитовой проходки**

При сравнении метода щитовой проходки с традиционными методами строительства туннелей метро, первый обладает такими преимуществами как малая площадь проведения работ над землей, низкий уровень влияния на окружающую среду, высокий уровень автоматизации, безопасность, экологичность и т. д. Сталкиваясь с задачами строительства туннелей больших диаметров, на длинных дистанциях и больших глубинах, метод щитовой проходки развивался и созрел, постепенно приобретая все большее доверие и количество сторонников; на сегодняшний день он становится основным методом туннельного метростроительства.

*Метод щитовой проходки имеет следующие основные преимущества:*

1) Высокая скорость. Щит является особым комплексным специализированным оборудованием для туннелестроительных работ, объединяющим в себе механические, электрические, гидравлические, сенсорные и информационные технологии. При щитопроходном методе экскавация земляных пластов, транспортировка грунта, установка обделки, спайка водонепроницаемых швов, заполнение хвостового зазора цементной суспензией и прочие работы проходят под защитой конструкции щита. При таком промышленном масштабе проведения работ, скорость экскавации сравнительно высока.

2) Высокое качество. В щитовом методе применяется тубинговая обделка, это легко контролируемое качество конструкции и эстетичный внешний вид.

3) Высокая эффективность. Скорость работ щитовым методом сравнительно высокая; так как сроки работ легко контролируемы, ощутимо повышается экономический и социально-инфраструктурный коэффициент полезности; при этом требуется малое количество персонала при низкой трудозатратности.

4) Высокий уровень безопасности. С применением щитового метода улучшились условия персонала, выполняющего работы в шахте. Проведение работ внутри корпуса щита позволяет избежать травм и снизить количество чрезвычайных происшествий.

5) Высокая экологичность. Малая площадь наземной рабочей площадки, сокрытая от глаз рабочая зона, малое шумовое и вибрационное воздействие на окружающую среду, прохождение наземных комплексных сооружений и зон, насыщенных подземными трубопроводными и кабельными коммуникациями, без нарушающего воздействия на окружающую инфраструктуру.

6) Стоимость и технологическая сложность работ в основном не зависят от глубины строительства, т.о. данная технология подходит для строительства туннелей на большой глубине. Сравнивая щитовой метод с открытым котлованным методом, с экономической и временной точки зрения, чем глубже шахта, чем хуже фундамент, чем больше коммуникаций и сооружений, создающих помеху для подземных работ, тем выгоднее применение щитового метода.

7) Проходя под реками или морями, туннелепроходные работы не влияют на судоходный фарватер; климатические условия также не создают никаких помех для строительства.

8) Высокий уровень автоматизации и информатизации. В щите применяются технологии компьютерного управления, лазерной навигации, опережающего геологического зондирования, сенсорные, измерительные и информационные технологии. Щит – это комплексное оборудование для производства туннелестроительных работ, объединяющее в себе сборочные, оптические, электрические, пневматические, гидравлические и информационные технологии, тем самым достигается преимущество высокой степени автоматизации. В нем также применяются такие возможности, как функция сбора данных о ходе работ, функция управления положением в пространстве, функция управления данными о ходе работ, функция передачи

данных о ходе работ в реальном времени, тем самым достигается высокая степень информатизации работ.

*Метод щитовой проходки обладает следующими недостатками:*

- 1) Стоимость оборудования достаточно высокая, значит, подходит не для всех проектов.
- 2) Щит сложно приспособить к условиям с изменением проходного сечения.
- 3) Сложно производить экскавацию при работах в условиях малого радиуса закругления ( $\leq 80$  м).

#### **2.1.6. Область применения метода щитовой проходки**

1) Относительно взаимодействия с теми или иными геологическими условиями и условиями окружающей среды существует множество различных способов туннельного строительства, однако, использование метода щитовой проходки при строительстве подземных туннелей все же обладает своими уникальными особенностями.

XXI век – это век подземных пространств, а щит – это основной инструмент в подземном строительстве, он играет ключевую роль в процессе разработки подземных пространств, особенно в условиях плотной населенности и загруженной транспортной инфраструктуры больших городов. Метод щитовой проходки является неотъемлемой частью современного строительства, и с постоянным развитием технологии строительства подземных сооружений, подземных трубо-кабельных коммуникаций, подземного железнодорожного сообщения он также идет в ногу со временем.

За последние полвека щитопроходный метод получил стремительный рост. Начав свой путь с ручной экскавации сжатым воздухом, он развивался до современных, разнообразных щитов с гидро- и грунтопригрузом, с возможностью работать на больших диаметрах, на проектах высокой сложности, на высоких скоростях, с применением «умных» технологий и получил широкое применение в различных передовых областях. Можно сказать, метод щитовой проходки подходит для всех типов экскавационных туннелестроительных работ в условиях мягких грунтовых пластов и мягких горных пород.

Существует много видов туннельного строительства. На стадиях изыскания, планирования и проектирования, при выборе способа проведения работ необходимо исходить из принципов применимости, экономичности, безопасности, качества и краткосрочности каждого способа для конкретных геологических условий и условий окружающей среды и проводить полное обоснование и сравнительный анализ. Применимость метода щитовой проходки для геологических условий и условий окружающей среды приведена в *таблице 2-1*.

##### **2) Область применения щитов большого диаметра**

Щиты диаметром более 10 м применяются в основном при строительстве подводных автомагистральных туннелей. Так, в Японии в 1998 году при строительстве автомагистрали через Токийский залив, использовались 8 щитовых установок с гидропригрузом диаметром 14.14 м; в немецком городе Гамбург четвертый автомобильный туннель на реке Эльба был построен с использованием щита с гидропригрузом от компании «Herrenknecht» диаметром 14.2 м; высокоскоростной железнодорожный туннель «Green Heart Tunnel», проходящий через район Green Heart в Нидерландах, построен французской компанией NFM с применением щита диаметром 14.87 м; в строительстве туннеля через реку Чонгминг в Шанхае использовался немецкий щит производства фирмы «Herrenknecht» с грунтопригрузом диаметром 15 м и длиной 44 м; два щитопроходных комплекта диаметром 11 м и длиной 38 м были использованы при строительстве автомагистрального туннеля в г. Ухань на реке Янцзы; туннель Shiziyang пассажирской железнодорожной магистрали, соединяющей Шеньчжень и Гонконг, был построен с применением четырех установок с гидропригрузом диаметром 11.18 м; при строительстве пересекающей ветки метро в Пекине применялся щит диаметром 11.97 м.

*Таблица 2-1. Применимость метода щитовой проходки для геологических условий и условий окружающей среды*

|                               |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
|-------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Описание способа работы       | Щит продвигается вперед в толще земли, производя туннелестроительную работу, подпирая все стороны шахты, посредством корпуса и тьюбингов создает защиту от обвала грунта. Щиты закрытого типа используют нагнетание глинистого грунта либо нагнетание глинистой воды для сопротивления давлению грунта, либо давлению глинистой воды забоя, тем самым обеспечивая стабильность забоя. Щиты открытого типа применяются при условии наличия самостабилизации грунта забоя, в противном случае необходимо применять дополнительные вспомогательные меры.                                                                                                                                                                                                                |
| Геология применения           | Обычно применим во всех видах пластов, от горных (петрографической формации) до почвенных. Однако в случае сложных либо специфических геологических условий следует проводить тщательное обоснование и выборку. Производится выбор подходящей формы щита. Относительно вышеупомянутых грунтовых слоев проходки следует суммировать спецификации щитов и провести тщательный анализ и обосновательную защиту по следующим видам грунтов: твердо-каменистые породы с хорошей целостностью, карстовые породы, поврежденные и вспученные каменные породы с высоким напряжением и сжатием, слои с содержанием твердых крупнофракционных каменных образований, валунно-галечниковые слои, слои повышенной вязкости, либо слои с вероятным наличием неизвестных помех и др. |
| Меры против грунтовых вод     | Щит закрытого типа, как правило, не требует вспомогательных мер, а в случае применения щита открытого типа требуются дополнительные вспомогательные меры.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
| Глубина туннеля               | Минимально допустимая глубина вышележащего слоя обычно больше диаметра туннеля. При работах с воздушным и шламовым пригрузом необходимо учитывать вероятность прорыва и фонтанирования на поверхность. Максимально допустимая глубина покрывающего грунтового слоя в основном зависит от величины давления грунтовых вод.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
| Форма сечения проходки        | Стандартной является круглая форма. С помощью особых щитов возможно также производить экскавацию полукруглой, сложносоставной, овальной, прямоугольной, подковообразной формы и других форм сечения.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| Размер сечения проходки       | На практике максимально достижимый диаметр проходки – 17.45 м. Как правило, в ходе работ очень сложно изменять диаметр сечения проходки.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| Проходка с резкими поворотами | На практике при проходке с резкими поворотами радиус закругления / внешний диаметр щита = 30.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
| Влияние на окружающие условия | В некоторых случаях, при наличии в непосредственной близости строений, либо сооружений, во время проходки приходится прибегать к вспомогательным мерам. За исключением области создания вертикальной шахты, влияние на транспортную инфраструктуру крайне мало.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |

Щиты больших диаметров также могут применяться для строительства подземных станций метро. Щитопроходный метод хорошо подходит для строительства трехсводчатых станций метро. Так, в Москве с помощью щита диаметром 9 ~ 10 м были построены три параллельных станционных туннеля и проходы между центральным и боковыми туннелями, формирующие трехсводчатую станцию (рис. 2-5). В Японии с помощью щита построили две параллельные туннельные линии станций метро и проходы между ними, формируя биноклеобразную форму станций.

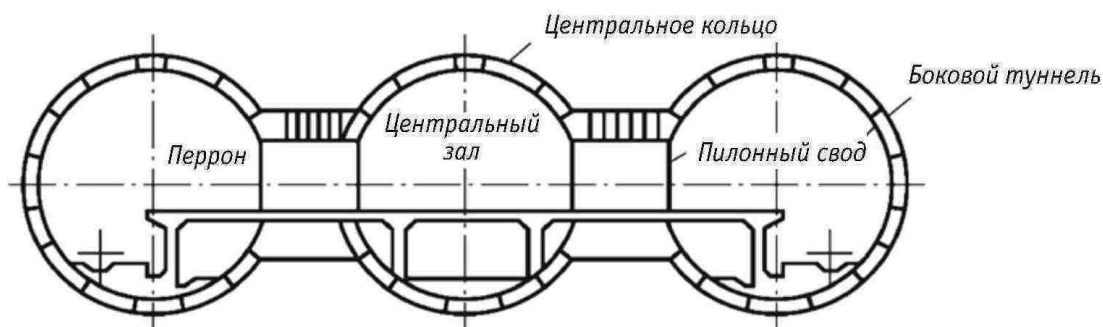


Рис. 2-5. Трехсводчатая станция метро щитопроходным методом

Применение щитового метода в водонасыщенных мягких слоях для строительства станций метро является более затратным по сравнению с методом строительства сплошных стен, поэтому в данных случаях щитопроходная технология применяется только в случае отсутствия возможности рытья котлована на поверхности земли. При этом, в благоприятных геологических условиях, таких как московская кембрийская глинистая почва и т. п., щитопроходный метод при строительстве глубоко пролегающих станций метро будет иметь преимущество.

3) Область применения щитов среднего диаметра

Щиты среднего диаметра 6.25 ~ 7 м применяются для строительства межзонных туннельных переходов подземных железнодорожных путей.

4) Область применения щитов малого диаметра

Щиты малого диаметра около 3 м используются в строительстве комплексных трубопроводов для отвода воды, канализации, прокладки кабелей, линий связи и других коммунальных сооружений. Так, для строительства газопровода «Запад-Восток», проходящего через реку Янцзы в районе Ченлинцзи, была применена щитопроходная установка с гидропригрузом диаметром 3.24 м.

## 2.2. РАЗВИТИЕ МЕТОДА ЩИТОВОЙ ПРОХОДКИ В КИТАЕ И ЗА ЕГО ПРЕДЕЛАМИ

В конце XVIII века британцы предложили идею строительства туннеля, пересекающего реку Темзу под Лондоном, и устроили обсуждение конкретных методов проведения раскопок, использования техники и т. д. В 1798 году была предпринята попытка воплощения этой идеи, но, вследствие того, что не удалось вырыть котлован на определенную глубину, план потерпел неудачу. Однако идея построить туннель через Темзу крепла день ото дня. Четыре года спустя Тревитик (Trevith) решил построить туннель, соединяющий две стороны пролива в другом месте, и развернул строительные работы. Однако работы не увенчались успехом: когда оставалось прокопать последние 30 м, забой стремительно заполнился водой, и туннель был затоплен, – идея туннеля под Темзой снова провалилась. Проектные работы продолжались пять лет с момента начала и до их вынужденного прекращения. За 10 лет после рождения плана пересечь Темзу существенного прогресса достигнуто не было.

В 1818 году Марк Брюнель увидел, как корабельные черви разъедают днище деревянного корабля, образуя отверстия, и на него снизошло озарение. Основываясь на этом, он выдвинул метод щитовой проходки и получил на него патент. Так появился прототип так называемого щита «открытого типа» с ручным способом копания. Брюнель был уверен в своем методе строительства и в 1823 году представил план еще одного туннеля между обоими берегами Темзы в Лондоне. Впоследствии этот план был утвержден Конгрессом, и в 1825 году проект стартовал. Общая протяженность туннеля составляла почти 458 м, а ширина туннеля – 11.4 м ×

6.8 м. На начальном этапе проект продвигался гладко; 12 января 1828 года произошло первое затопление и остановка работ, тогда один из директоров компании лондонского метрополитена (Callodam) выдвинул Брюнелю предложение использовать сжатый воздух в строительстве, однако оно не получило одобрения Брюнеля.

После вынужденной остановки проекта Брюнель не потерял надежду; он учел уроки поражений и в течение 7 лет продолжал совершенствовать конструкцию щита. В 1834 году работы возобновились, и в 1841 году шахта туннеля достигла другого берега, а в 1843-м работы были окончательно завершены, и туннель был сдан в эксплуатацию. В ходе работ Брюнель использовал прямоугольную чугунную каркасную конструкцию щита. С того момента, как Брюнель принял вызов, и до полного завершения проекта прошло более 20 лет. После многих лет упорной работы Брюнель преодолел многочисленные трудности и наконец одержал окончательную победу. На тот момент он уже был 72-летним стариком. Вклад Брюнеля в создание метода щитовой проходки оказался огромным, в этом единодушны все последующие поколения.

### **2.2.1. Развитие метода щитовой проходки в мире**

С момента создания прямоугольного щита Брюнелем прошло еще 23 года усовершенствований, и в 1869 году был построен второй туннель под Темзой. Впервые использовалась круглая форма сечения, диаметр туннеля составил 2.18 м, а длина 402 м. Руководили этим проектом двое ученых – Барлоу и Грейтхед. Грейтхед применил новые разработки круглого щита с использованием чугунных веерообразных сегментов, и проходческие работы были успешно завершены без каких-либо происшествий. Впоследствии при строительстве Южно-лондонского железнодорожного туннеля в 1886 году, Грейтхед успешно объединил метод щитовой проходки и работы сжатым воздухом, это стало фундаментом для щитопроеходной технологии в ее нынешнем виде. От первых неудач и разочарований Тревитика до изобретения Брюнелем щита с ручной экскавацией и последующего его усовершенствования и применения круглого щита Грейтхедом прошло долгих 80 лет. Применение сжатого воздуха в щитовой проходке ознаменовало собой крупный прогресс в прокладке туннелей в условиях напорных грунтовых вод, заполнило пробел в конструкции щитов и способствовало дальнейшему распространению щитопроеходной технологии во всем мире.

С конца XIX века до середины XX века метод щитовой проходки последовательно проник в США, Францию, Германию, Японию, Советский Союз и другие страны, где получил развитие в разной степени. США первыми разработали щит закрытого типа в 1892 году; в том же году во Франции в Париже использовали бетонные кольцевые сегменты для строительства канализационного туннеля; в 1896–1899 годах Германия построила Берлинский туннель с использованием стальных тубингов; а в 1913 году Германия построила под Эльбой туннель с сечением подковообразной формы; в 1917 году Япония применила метод щитовой проходки при строительстве Национальной железной дороги Хэцу, но из-за плохих геологических условий его пришлось приостановить; в 1931 году Советский Союз использовал английский щит при строительстве туннеля Московского метрополитена, в работах применялся метод химического бетонирования и застывания; в 1939 году Япония использовала круглый щит с ручной экскавацией для строительства туннеля Канмон диаметром 7 м; в 1948 году в Советском Союзе был построен туннель Ленинградского метрополитена; в 1957 году Япония применила щит закрытого типа для строительства туннеля токийского метро.

В период 60–80-х годов XX века метод щитовой проходки продолжил свое развитие, добившись значимых результатов. В 1960 году в Лондоне начали применять проходческую машину барабанного типа; в том же году в Нью-Йорке впервые были применены гидравлические домкраты для проходки щита; в 1967 году при строительстве туннеля Сайтама в Японии впервые использовался щит с гидропригрузом от компании «Мицубиси», в котором впервые

была осуществлена технология нагнетания глинистой воды; в 1963 году японская компания «Satto Kogyo» представила щит с грунтопригрузом, и в 1974 году он был успешно применен в Токио, а в 1975 году был запущен щит с гидропригрузом. В 1978 году Япония представила разработку щита с гидропригрузом высокой концентрации; в 1981 году в Японии вышел в свет пузырьковый щит; в 1982 году Япония изобрела щитопроходный метод ECL (Extruded Concrete Lining – экструдированная бетонная обделка); в 1988 году там же был изобретен метод парнокольцевой проходки шламового типа; в 1989 году Япония представила разработку метода H&V и метода бетонирующей проходки. Таким образом, характерной особенностью данного периода стало изобретение множества новых типов щитовой проходки и широкое применение щитов с гидро- и грунтопригрузом.

После 1990 года технический прогресс метода щитовой проходки был чрезвычайно значительным и получил следующие характерные особенности:

*1) Увеличение дистанции и диаметра проходки.*

Туннель под Ла-Маншем (также известный как Евротуннель) между г. Дувр в Великобритании и г. Сангатт во Франции, соединивший две страны, состоит из двух однолинейных железнодорожных веток диаметром 7.6 м и одной вспомогательной ветки диаметром 4.8 м. В настоящее время является одним из трех крупнейших подводных туннелей в мире. Его строительство началось в декабре 1987 года, вспомогательный туннель был сдан 1 декабря 1990 года, северная ветка была завершена 22 мая 1991 года, а строительство южной ветки завершилось 28 июня 1991 года. Туннель под Ла-Маншем был завершён и сдан в эксплуатацию в июне 1993 года. Протяженность однополосной железнодорожной линии туннеля под проливом составила более 49 км, из которых 38 км составил участок, проходящий по морскому дну, а максимальная глубина туннеля составила 100 м. Туннель под Ла-Маншем был разделен на 12 строительных секций по всей линии; на французской стороне использовались пять щитопроходных установок с грунтопригрузом диаметром 8.8 м, а со стороны Великобритании использовали шесть сдвоенных проходческих машин.

При строительстве туннеля через Токийский залив в Японии были применены восемь щитопроходных установок диаметром 14.14 м, работы закончились в 1996 году, а в 1998 году туннель протяженностью 15.1 км был сдан в эксплуатацию.

При строительстве туннеля через пролив Сдоберт в Дании использовались четыре щита с грунтопригрузом диаметром 8.782 м, 18-километровый проект объединил берега пролива туннелем протяженностью 7.9 км и был успешно завершён в 1996 году.

Проект строительства четвертого туннеля через Эльбу в Германии был выполнен с применением одной шламовой щитопроходной установки диаметром 14.2 м и успешно завершён в 2003 году.

В 2004 году при прохождении туннеля Green Heart Tunnel в Нидерландах использовался щит с гидропригрузом диаметром 14.87 м.

*2) Разнообразие видов сечения проходки.*

Что касается формы поперечного сечения, появилось множество щитов самой разной формы поперечного сечения, таких как: прямоугольные, прямоугольновидные, подковообразные, эллиптические и многокруглые (двухкруглые, трехкруглые). С функциональной стороны использования появились такие виды как: сферические щиты, материнские щиты (MSShield), расширяющиеся щиты, щиты переменного диаметра, разнонаправленные щиты (H&V), щиты с заменяющимися резцами в процессе проходки (бескотлованные), щиты напрямую удаляющие препятствия на пути и другие особые щиты; со стороны способа экскавации появились такие, как щиты со встряхивающей и качающей экскавацией, оставившие традиционные методы вращательной экскавации в прошлом.

*3) Свобода проведения работ.*

В щитопроходных комплексах появилось такое оборудование, как автоматические установки подачи, перемещения и монтажа тубингов; системы автоматического контроля направления движения и местоположения во время проходки; системы управления автоматизацией и информатизацией, а также системы определения неполадок.

### **2.2.2. История развития щитопроходной технологии в Китае**

#### *1) Начальный этап развития щитопроходной технологии в Китае*

В 1953 году для строительства северо-восточной угольной шахты Фусинь использовали щит с ручной экскавацией диаметром 2.6 м и предварительно изготовленные небольшие бетонные блоки для формирования стоков дренажных вод. Этот туннель стал первым в Китае, построенным с помощью метода щитовой проходки. В 1957 году при строительстве пекинского канализационного туннеля применили щит диаметром 2.6 м.

#### *2) Прогресс и развитие технологии щитовой проходки в 60–70-е годы XX века*

В 1962 году компания туннельных работ Управления городского строительства г. Шанхай провела систематические испытания щитопроходной установки в условиях шанхайских мягких грунтовых слоев. Для этого был изготовлен простой щит открытого типа с ручной экскавацией диаметром 4.16 м. Испытания проводились на двух показательных видах пластов. Для стабилизации алевроитных и мягких глинистых пластов использовали водное осаждение и воздушную компрессию. После проведения многократных процедур обоснования и наземных испытаний, в качестве облицовки туннеля были выбраны однослойные железобетонные тубинги, соединенные между собой болтами, а в качестве гидроизоляционного материала швов использовалась каменноугольная эпоксидная смола. Длина туннеля составила 68 м, испытания прошли успешно, было собрано большое количество полезных данных о туннельном строительстве щитопроходным методом.

В мае 1966 года был построен первый подводный автомобильный туннель в Китае – главный туннель трансазиатского шоссе Шанхай – Дапу, в котором был применен сетевой экструзионный щит диаметром 10.22 м. Стабилизация забоя осуществлялась с помощью воздушной компрессии. Туннель проходил по дну реки Хуанпу на глубине 16 м, а общая протяженность экскавации составила 1322 м. Автомагистральный туннель Дапу был завершен и открыт для движения в конце 1970 года. Используемый на этот раз сетевой щит был улучшен, и открытая конструкция теперь могла преобразовываться в конструкцию закрытого типа.

В 1973 году при строительстве одного туннеля для отвода сточных вод и двух водоприемных туннелей на Шанхайском нефтехимическом заводе в Цзиньшане использовалась одна сетевая щитопроходная машина с гидравлической механикой вывода земли диаметром 3.6 м и два экструзионных сетевых щита диаметром 4.3 м. В общей сложности протяженность проходки подводного туннеля составила 3926 м. Так впервые была применена технология строительства водозаборных и дренажных туннелей с использованием вертикальных домкратов.

#### *3) Прогресс и развитие технологии щитовой проходки в 80-х годах XX века*

В 1980 году в Шанхае был построен испытательный участок первой линии метро, был разработан и изготовлен щит экструзионного сетевого типа диаметром 6.412 м, в котором применялась технология гидропригруза и частичного воздушного пригруза. Туннель был проложен в глинисто-илистых пластах, и его протяженность составила 1130 м. В 1982 году при строительстве 1476-метровой главной кольцевой северной линии проекта Yan'an East Road – North Line в прибрежном районе Вайтань в Шанхае был спроектирован компанией «Shanghai Tunnel Co., Ltd» и изготовлен на Цзяннаньском судостроительном заводе сетевой экструзионный щит с гидравлическим способом отведения земли диаметром 11.3 м.

В 1985 году в рамках проекта по строительству дренажного туннеля Shanghai Furongjiang Road был представлен щит с грунтопригрузом и малоразмерным резцовой головкой производства японской компании «Kawasaki Heavy Industries», диаметр которого составил 4.33 м.

Длина экскавации составила 1500 м, выполнялась она механизированным способом, а выведение грунта осуществлялось с помощью шнекового механизма, что увеличивало эффективность работы, уменьшало негативное влияние на поверхность земли и имело ряд прочих особенностей.

В 1986 году Китайская корпорация железнодорожных туннелей разработала и выпустила полусекционный щит с резцовой головкой вилочного типа, который успешно использовался при строительстве поворотной линии Фусинмэнь пекинского метро.

В 1987 году компания «Shanghai Tunnel Co., Ltd» успешно разработала и выпустила первый в стране щит с грунтопригрузом шламокомпрессионного типа диаметром 4.35 м, который использовался в строительстве кабельного туннеля через реку на железнодорожной станции Шинань. Туннель прошел через алевроитный слой дна реки Хуанпу, длина экскавации составила 583 м. Такое технологическое достижение для 80-х годов стало прецедентом международного уровня, и проект получил главную награду Национальной премии за научно-технический прогресс в 1990 году.

4) Прогресс и развитие технологии щитовой проходки в 90-х годах XX века.

В 1990 году началось строительство главной линии Шанхайского метрополитена и для строительства 18-километрового туннельного отрезка ветки № 1 использовались семь щито-проходных комплексов с грунтопригрузом диаметром 6.34 м, спроектированных компанией «Shanghai Tunnel Co., Ltd» и Шанхайским институтом туннельного проектирования совместно с французской компанией FCB и произведенных Шанхайским судостроительным заводом. Длина проходки каждого щита составила более 200 м в месяц, а просадка поверхности контролировалась на уровне +1 ~ -3 см.

В 1996 году при строительстве ветки № 2 Шанхайского метрополитена снова использовались эти семь щито-проходных комплексов с грунтопригрузом, также французской компанией FMT были предоставлены два щита с грунтопригрузом; протяженность экскавации данного участка туннеля составила 24 км. Компания «Shanghai Tunnel Co., Ltd» также самостоятельно спроектировала и изготовила десятый щит для проходки данной ветки.

В 90-е годы XX века компания «Shanghai Tunnel Engineering Co., Ltd» самостоятельно разработала и изготовила шесть щито-проходных установок с грунтопригрузом, диаметрами от 3.8 м до 6.34 м, которые использовались для строительства туннелей метро, водозаборных и дренажных туннелей, кабельных туннелей и т. д. Общая протяженность проходческих работ составила около 10 км.

Также в период 90-х годов в ходе трубоукладочных работ использовались грунтопригрузные трубопротяжные машины диаметром от 1.5 м до 3.0 м с малой и большой резцовыми головками. В районах Шанхая было использовано более 10 установок, а длина протяжки труб составила около 20 км. В 1998 году в рамках проекта строительства туристического туннеля через реку Хуанпу был куплен подержанный иностранный щито-проходный комплекс шарнирного типа с грунтопригрузом, диаметр которого составлял 7.65 м. После реставрации машина показала хорошие рабочие характеристики и успешно произвела проходку на дистанцию 644 м.

В 1996 году для строительства южной ветки 1300-метрового кольцевого главного туннеля проекта «Шанхай – Яньань ист-роуд» была использована щито-проходная установка с гидropriгрузом диаметром 11.22 м, импортированная из Японии.

В 1996 году участок туннеля ветки № 1 метрополитена Гуанчжоу длиной 8.8 км был построен компанией «Japa Aoki Company» с использованием двух установок с гидropriгрузом диаметром 6.14 м и одной установки с грунтопригрузом такого же диаметра. В мае 1999 года компания «Shanghai Tunnel Co., Ltd» успешно разработала и выпустила первую в стране комбинированную трубопротяжную проходческую установку с грунтопригрузом, которая обладала резцовой головкой квадратной формы размером 3.8 м × 3.8 м и использовалась

для прохождения 120 м туннеля при строительстве станции метро Pudong Lujiazui и двух пешеходных переходов.

В феврале 2000 года при строительстве второй ветки метрополитена Гуанчжоу от площади Хайчжу до района Цзяннань Синьцунь применялись два щитопроходных комплекса комбинированного типа с грунтопригрузом диаметром 6.14 м, модифицированных компанией «Shanghai Tunnel Co., Ltd», которые осуществили проходку через слои выветренной горной породы дна реки Чжуцзян.

В 2001 году при строительстве ветки № 2 метрополитена г. Гуанчжоу, ветки № 1 метрополитена г. Нанкин, ветки № 1 метрополитена г. Шэньчжэнь, ветки № 5 метрополитена г. Пекин и ветки № 1 метрополитена г. Тяньцзинь, применялись 14 единиц щитопроходных установок с грунтопригрузом и комбинированных установок из Германии и Японии, диаметр которых составлял от 6.14 до 6.39 м, с помощью которых была осуществлена проходка длиной в 50 км.

В 2003 году при строительстве ветки № 8 Шанхайского метрополитена впервые была применена технология туннеля в форме сдвоенного кольца. При этом применялись два щитопроходных комплекса с грунтопригрузом и формой сдвоенной окружности  $\varnothing 6520 \times W11120$ , которые были доставлены из Японии. Протяженность отрезка от станции Huangxing Road до станции Kailu Road составила 2.6 км.

В 2004 году в рамках проекта Shanghai Shangzhong Road при строительстве туннеля, проходящего через реку, был использован щит с гидропригрузом большого диаметра 14.87 м, с помощью которого удалось проложить два туннеля вдоль реки Хуанпу. Конструкция туннеля вместила две 4-полосные автомагистрали.

Щитовые туннели стали основным методом строительства городских туннелей метро в Китае. К примеру, ветка № 1 метро г. Гуанчжоу была построена с использованием 2 щитов с гидропригрузом и 1 щита с грунтопригрузом; ветка № 2 – с использованием 6 щитов с грунтопригрузом; ветка № 3 – с использованием 13 щитов с грунтопригрузом и 2 установок с гидропригрузом; ветка № 4 – с использованием 10 щитов с грунтопригрузом; ветка № 5 – с использованием 24 щитов с грунтопригрузом и 2 щитов с гидропригрузом; ветка № 6 – с использованием 14 щитов с грунтопригрузом и 1 установки с гидропригрузом; особо длинные участки веток № 2 и № 8 были построены с помощью 8 щитов с грунтопригрузом и 2 щитов с гидропригрузом; северный отрезок ветки № 2 – с использованием 12 щитов с грунтопригрузом и 2 щитов с гидропригрузом; туристическая обзорная ветка была построена с помощью 6 щитов с грунтопригрузом; ветка Гуанфо – с использованием 12 щитов с грунтопригрузом и 2 щитов с гидропригрузом.

В 2005 году началось строительство ветки № 1 метрополитена г. Ченду, ветки № 2 метрополитена г. Сиань, ветки № 1 метрополитена г. Шэньян, ветки № 1 метрополитена г. Ханчжоу и других туннелестроительных объектов, в которых также использовался метод щитовой проходки. Вскоре после этого развернулось строительство метрополитенов в городах Ухань, Чунцин и Сучжоу.

Шанхайский автомобильный туннель Сянинь был построен в 2006 году с использованием щита с гидропригрузом диаметра 11.58 м.

Строительство автомагистрального туннеля через реку Янцзы началось в 2004 году, в 2006 году щит был погружен в шахту, и уже к 2008 году строительство было завершено. В проекте применялись два щита с гидропригрузом диаметром 11.38 м.

Строительство Северного моста Южного туннеля по проекту Шанхайского туннеля через устье реки Янцзы (также известного как Шанхайский туннель Хучонг) происходило с 2004 по 2006 год, в проекте применялся крупнокалиберный щит с гидропригрузом диаметром 15.44 м.

В 2007 году при строительстве туннеля Шицзыян пассажирской железнодорожной линии Гуанчжоу – Шэньчжэнь – Гонконг использовались 4 щитопроходных комплекса с гидропригрузом диаметром 11.18 м.

В 2008 году при строительстве подземной части пекинской железной дороги был использован щит с гидропригрузом диаметром 11.97 м.

В 2008 году Китайская корпорация железнодорожных туннелей самостоятельно разработала и выпустила комбинированный щит диаметром 6.39 м, с помощью которого был построен метрополитен г. Тяньцзинь.

## **2.3. ПРОИЗВОДСТВО РАБОТ МЕТОДОМ ЩИТОВОЙ ПРОХОДКИ**

### **2.3.1. Производство работ с помощью щита с грунтопригрузом**

На *рис. 2-6* показан рабочий процесс туннельного строительства методом щитовой проходки с помощью щита с грунтопригрузом. Как видно на рисунке, грунт, срезанный режущей головкой, поступает в землеприемный призабойный отсек и выводится из него шнековым способом, образуя перепад давления; по мере продвижения щита вперед, шнековый конвейер выгружает грунт с такой скоростью, чтобы количество выгружаемого грунта было равным объему экскавации, чтобы грунтовые слои поверхности забоя всегда сохраняли стабильность. Количество выгружаемого грунта регулируется путем регулировки скорости шнека и открытия заслонки выемки; шлаковый грунт поступает со шнека на ленточный конвейер, а затем с ленты падает в расположенную ниже транспортировочную вагонетку, на которой грунт транспортируется лебедочным способом к начальному котловану; затем установленный над котлованом порталый кран поднимает вагонетку на поверхность и выгружает шлаковый грунт в зону временного хранения, откуда грунт с помощью экскаватора загружается в самосвал и увозится.

### **2.3.2. Производство работ с помощью щита с гидропригрузом**

На *рис. 2-7* показан процесс работ с помощью проходческого щита с гидропригрузом. Насос подачи выкачивает суспензию (смесь воды и бентонита) из смешительного резервуара, установленного на поверхности, и направляет по трубопроводу в шламоприемный призабойный отсек щита; в заполненном шламоприемном отсеке суспензия под давлением проникает в грунт на несколько сантиметров. Таким образом бентонит внедряется в промежутки между частицами грунта, образуя «корковый» слой, тем самым слой грунта на поверхности выемки становится более стабильным и водонепроницаемым; посредством вращения рабочего органа, ставшая «коркообразной» поверхность выемки разрушается и содержимое смешивается с бентонитовой суспензией, а затем отводится выводным насосом и перегонным насосом по выводному трубопроводу в расположенную на поверхности сепараторную станцию; сепараторная станция отделяет шлаковый грунт от бентонитовой суспензии; отделенная от грунта суспензия попадает в смеситель, где проходит определенные качественные преобразования, после которых она может использоваться повторно, а затем вновь направляется подающим насосом в шламоприемный отсек щита.

По своей сути, метод щитовой проходки с гидропригрузом представляет собой способ экскавации, в котором в качестве медиаторной среды используется шламовая мембрана, уравнивающая давление грунта давлением шламовой суспензии. Насос подачи суспензии транспортирует ее по трубопроводу непосредственно с поверхности земли на поверхность забоя, которая, в свою очередь, остается полностью изолированной, что обеспечивает высокий уровень безопасности работ и хорошие условия проходки. Другими словами, щит с гидропригрузом не оказывает чрезмерного давления на окружающие слои и не подвергается их обратному давлению, тем самым уменьшая негативное влияние на окружающие грунтовые массы. Как правило, данный метод не требует проведения вспомогательных мероприятий (за исключением работы в условиях пластов с высокой водопроницаемостью и галечных пластов, при которых трудно поддерживать стабильность поверхности забоя). Данный метод особенно

актуален при большом сечении забоя, так как с точки зрения проседания грунта во время работ он наиболее применим, нежели метод проходки с грунтопригрузом.

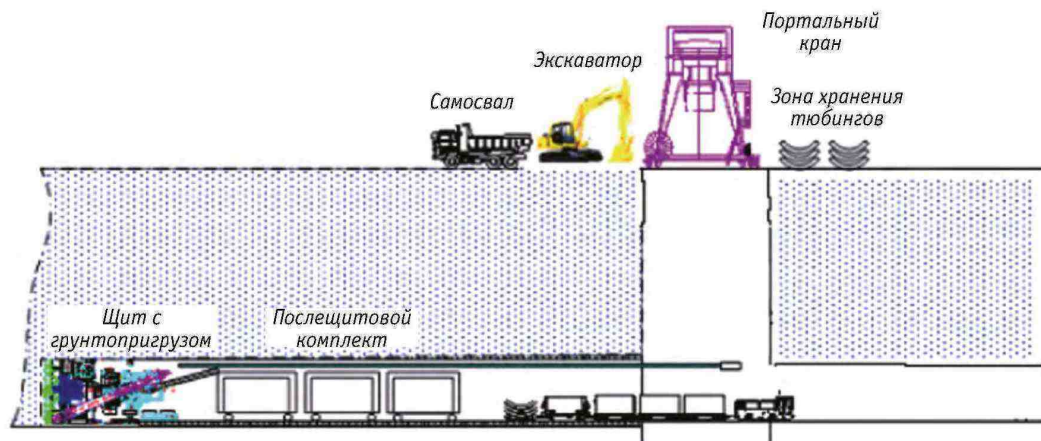


Рис. 2-6. Схема проходки щита с грунтопригрузом

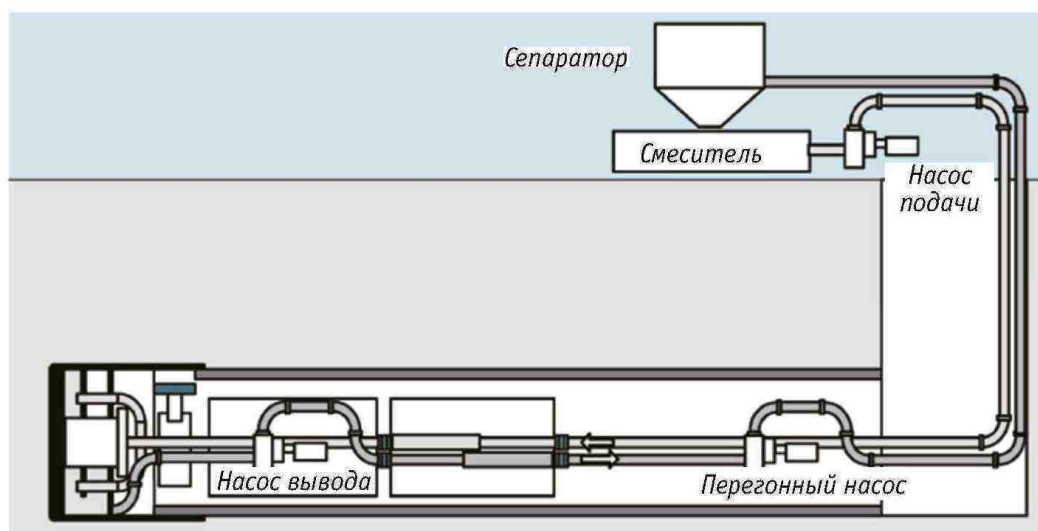


Рис. 2-7. Схема проходки щита с гидropriгрузом

### 2.3.3. Технологические методы разнообразных сечений проходческих щитов

Перечисленные выше методы проходческих щитов используются для сооружения однопутных туннелей круглого сечения. Метод отличается устойчивостью и прекрасными эксплуатационными характеристиками, но в определенных областях коэффициент использования невысок, является неэкономичным или может ограничить эффективное использование подземного пространства. В последние годы постепенно набирают популярность проходческие щиты со специальным инженерно-техническим подходом к сооружению туннелей некругового сечения (технические методы щитовой проходки для разнообразных сечений). Принципы работы будут описаны ниже.

#### 1) Проходческий щит свободного сечения

На рис. 2-8 показано, что у распространенного проходческого щита круглого сечения, как и у проходческого щита свободного сечения, также есть основная фреза, но на ее наружной части находятся планетарные фрезы меньшего сечения. Во время вращения основной фрезы,

планетарные совершают движение по своей оси, огибая основную, как планеты в солнечной системе. Колея вращения планетарных фрез определяется углом колебаний их лап. Регулируя положение лапы, можно углубить туннель нестандартной (некруглой) формы. Другими словами, подобрав колею вращения планетарных фрез, можно добиться прямоугольного сечения, овального, эллиптического, подковообразного и других форм сечений. Проходческий щит свободного сечения пригоден для случаев ограниченных подземных пространств, примером является прокладка туннелей малого и среднего типа, лежащих между трубопроводными путями и водными каналами.

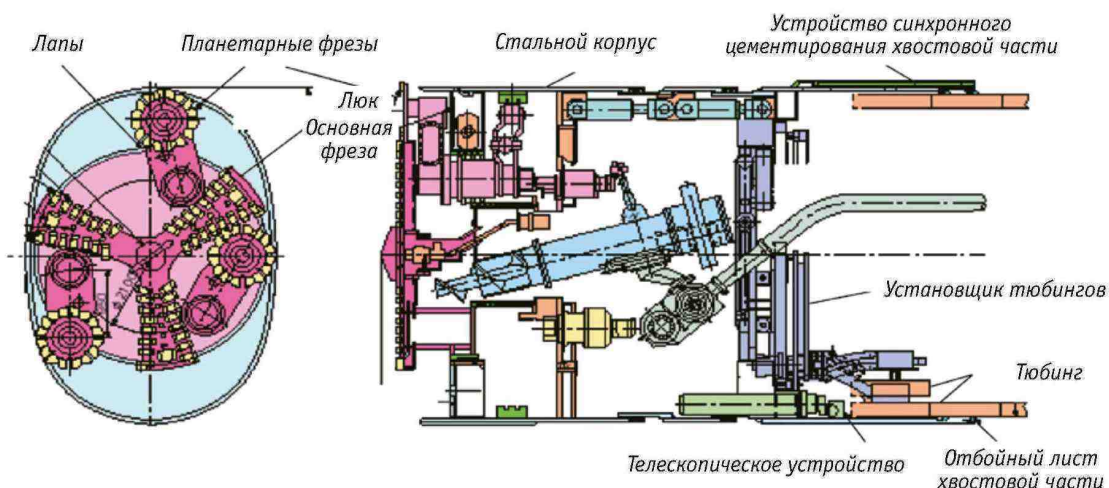


Рис. 2-8. Схема устройства проходческого щита свободного сечения

Данный инженерно-технический подход помогает углублять многочисленные туннели нестандартной формы. Туннель с узким и длинным сечением можно эффективно расширить или углубить ограниченное подземное пространство в нем. Для достижения разнообразных целей, можно рационально выбрать подходящее сечение. Например, для коммуникационных туннелей.

## 2) Эксцентрический многоосный проходческий щит

В данном инженерно-техническом подходе используется эксцентрический многоосный проходческий щит, особенностями которого являются: применение многочисленных ведущих валов, перпендикулярно к которым устанавливается набор коленчатых валов. На коленчатых валах монтируются фрезодержатели. Во время вращения ведущих валов, фрезодержатели образуют вращающуюся дугу. Сечение раскопанного участка принимает форму фрезодержателя. Таким образом, в соответствии с требованиями к форме поперечного сечения, форма фрезодержателя может быть круглой, куполообразной, овальной или подковообразной. Схематическое изображение принципов строительных работ эксцентрического многоосного проходческого щита по созданию круглого и квадратного сечения показано на рис. 2-9. На рис. 2-10 показано натуральное изображение описанного проходческого щита.

Эксцентрический многоосный проходческий щит обладает нижеследующими преимуществами:

1. Позволяет выбрать меньший крутящий момент привода благодаря минимальному радиусу поворота фрезодержателя. Так как несколько осей вращения приводят в движение фрезодержатель, проходческий щит кажется компактным, легко собирается, разбирается и перемещается. Применяется для прокладки туннелей с большой площадью сечения.

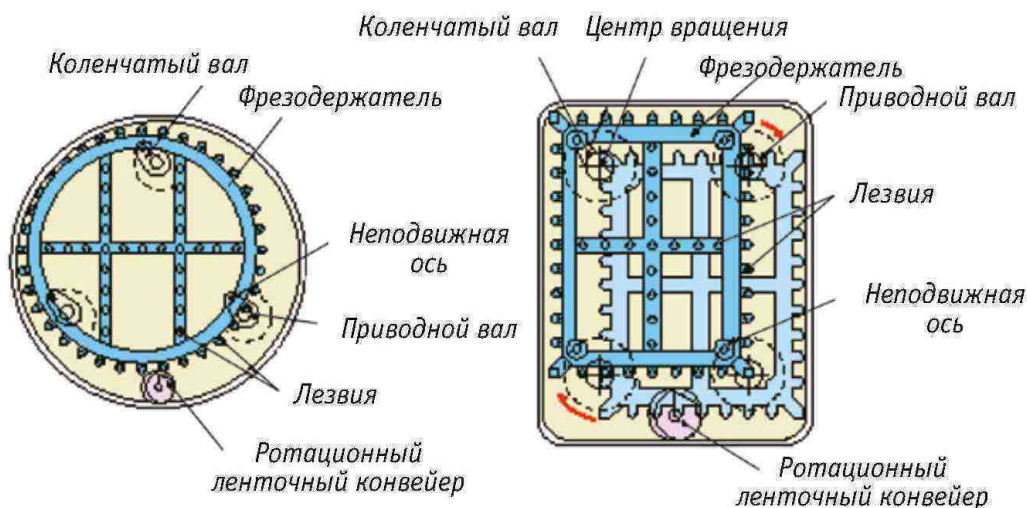


Рис. 2-9. Схематическое изображение принципов строительных работ эксцентрического многоосного проходческого щита

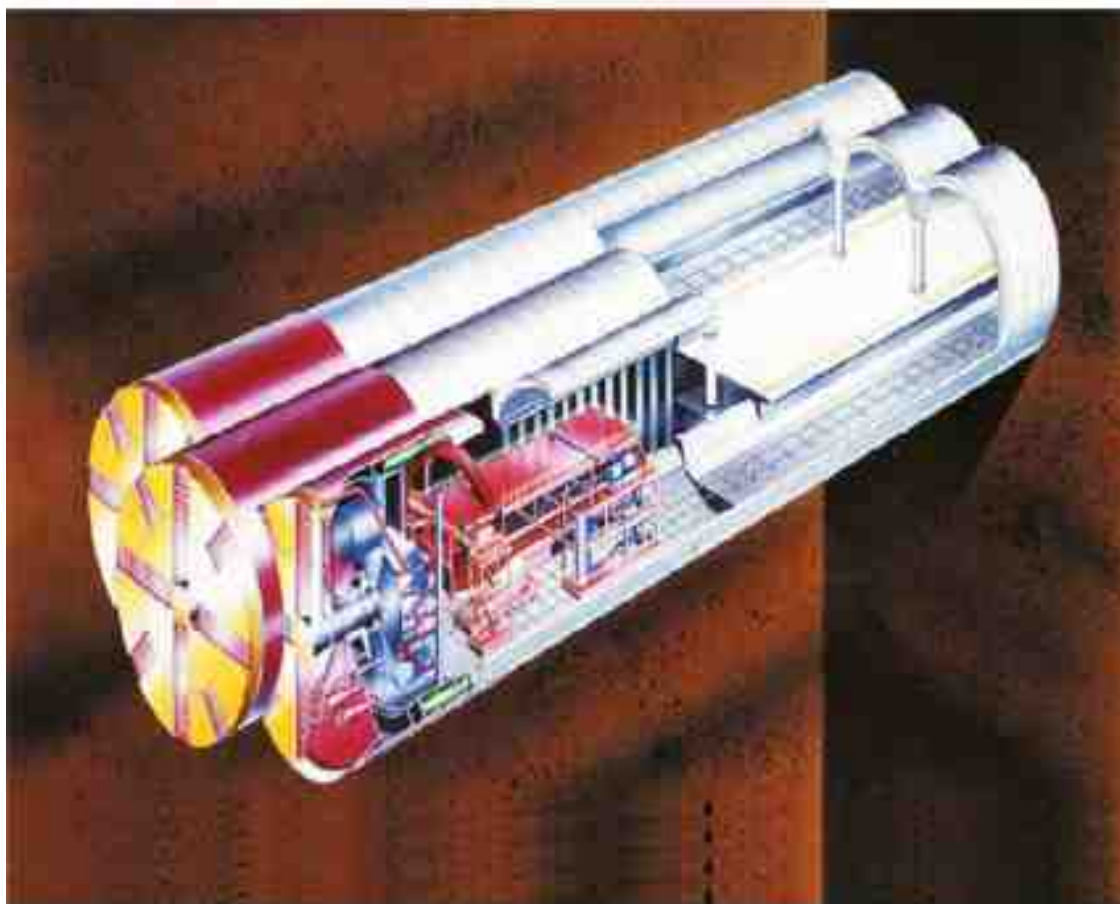


Рис. 2-10. Натуральное изображение многоосного проходческого щита

2. Из-за минимального радиуса вращения фрезодержателя, фрезы проходят меньшее расстояние. Рассмотрим данный параметр с точки зрения износа лезвий. По сравнению с обычным проходческим щитом данный тип пройдет расстояние как минимум в три раза большее. Применяется для прокладки протяженных туннелей. Эксцентрический многоосный проходческий щит обладает нижеследующими преимуществами: 1. Позволяет выбрать меньший крутящий момент привода благодаря минимальному радиусу поворота фрезодержателя. Так как несколько осей вращения приводят в движение фрезодержатель, проходческий щит кажется компактным, легко собирается, разбирается и перемещается. Применяется для прокладки туннелей с большой площадью сечения. 2. Из-за минимального радиуса вращения фрезодержателя, фрезы проходят меньшее расстояние. Рассмотрим данный параметр с точки зрения износа лезвий. По сравнению с обычным проходческим щитом данный тип пройдет расстояние как минимум в три раза большее. Применяется для прокладки протяженных туннелей. 3. Из-за миниатюрного привода фрезодержателя, пространство для осуществления строительных работ больше, что позволяет по мере необходимости размещать внутри проходческого щита оборудование по улучшению грунта для осуществления данной процедуры в любой точке туннеля. Применяется для прокладки туннелей с минимальным радиусом кривизны, в условиях расположения туннелей на небольшом расстоянии друг от друга, при неблагоприятных условиях проведения работ (плохое качество грунта) и т. д.

*3) Проходческий щит MF (проходческий щит с несколькими рабочими частями)*

Состоит из нескольких совмещенных частей кругового сечения соединенных вместе, способен создать несколько круговых сечений (рис. 2-11). Эффективная площадь нескольких круговых сечений будет больше в сравнении с разработанной площадью одиночного сечения, что делает данный тип экономически целесообразным. Два и более круглых сечения различного диаметра складываются по определенным принципам и обеспечивают желаемую форму сечения туннеля. При планировании линии туннеля существует большое разнообразие в выборе его формы. Например, в условиях ограниченного сверху и снизу пространства можно выбрать сложенный поперек тип, как показано на рис. 2-12. Проходческий щит MF подходит для разработки станций метро, коммуникационных туннелей, подземных автостоянок и других туннелей с масштабными сечениями.



*Рис. 2-11. Проходческий щит MF*

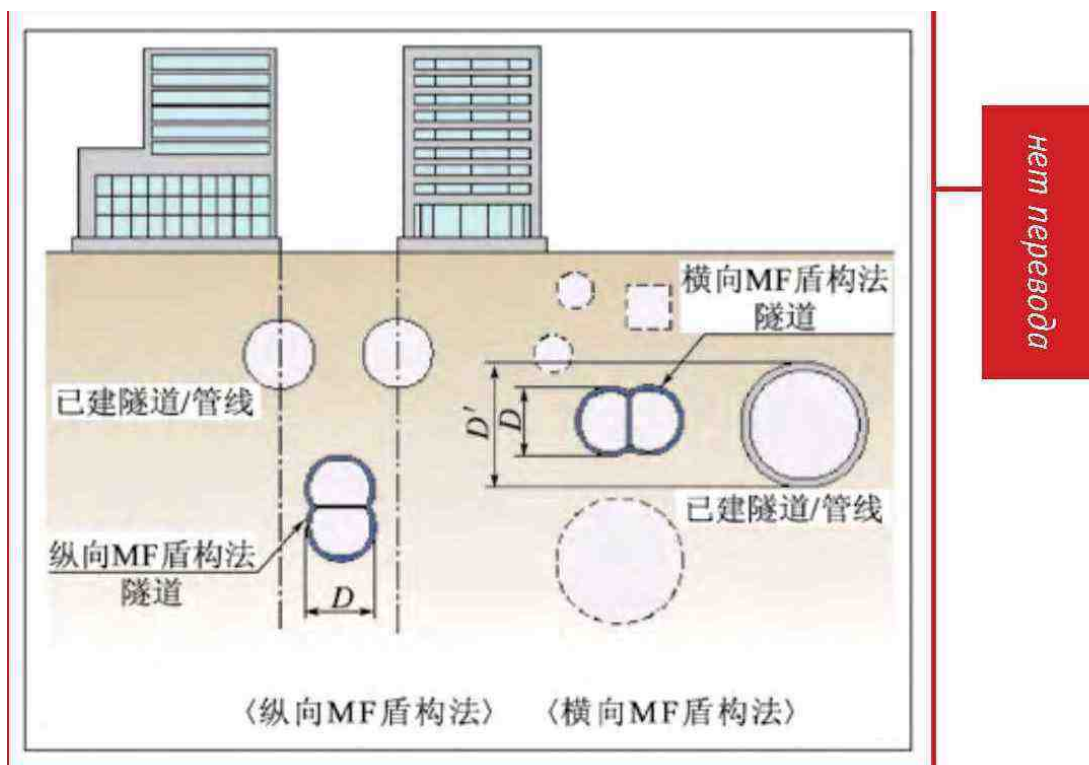


Рис. 2-12. Схематическое изображение практического применения проходческого щита MF

Важные преимущества проходческого щита MF:

1. Основное конструктивное исполнение всех строящихся туннелей по-прежнему – круглое, поэтому механическая особенность кругового сечения была сохранена. Упомянутый туннель формируется несколькими независимыми, контролируруемыми мелкими круглыми секциями, соединенными между собой. Коэффициент использования малого сечения при разработке выше. Кроме того, исходя из различных геологических условий, производится управление процессом углубления грунта.

2. При планировании линии туннеля доступна большая гибкость при выборе формы его сечения. Например, по мере необходимости можно выбрать горизонтальный или вертикальный проходческий щит MF.

3. Для проведения работ может быть выбран проходческий щит с гидропригрузом или грунтопригрузом.

4. При регулировке скорости и направления вращения каждой из фрез противодействующая сила, действующая на корпус проходческого щита, стабилизирует его положение во время работы, легко исправляя ошибочный уклон.

#### 4) Горизонтально-вертикальный проходческий щит (проходческий щит H&V)

Так называемый проходческий щит H&V (полное название на английском языке – горизонтальное и вертикальное изменение) представляет собой несколько круглых сечений, которые по мере необходимости комбинируются между собой. Благодаря разработке многочисленных форм сечения туннелей, является особым методом строительства. Проходческий щит H&V можно использовать в строительных работах, как показано на рис. 2-13, спиральный и бифуркационный типы могут одновременно прорывать несколько линий туннелей. Данный способ применения проходческого щита используется в соответствии с условиями строитель-

ства и целями применения туннеля, с его помощью, из-за свободного прохождения в толще грунта, можно изменять форму сечения туннеля и его направление. Основным принцип устройства – применение шарнирного соединения вилочного типа, изменяющего направление движения механизма. Механизм позволяет передней части тела проходческого щита самостоятельно вращаться в противоположном направлении. Применение данного вида шарнирного соединения позволяет проходческому щиту создавать крутящий момент, позволяя достигнуть спирального движения вперед.

Проходческий щит H&V имеет следующие преимущества:

1. Специальное шарнирное сочленение изменяет направление механизма, что облегчает контроль над положением и направлением проходческого щита. Приводной механизм и механизм разработки туннеля являются автономными, что позволяет при разном качестве грунта раздельно управлять процессом забоя. Для проведения работ может быть выбран проходческий щит с гидропригрузом или грунтопригрузом.

2. В туннеле под землей можно свободно передвигаться и менять траекторию движения. Благодаря отсутствию необходимости сооружать рабочую шахту, сокращается срок работ и снижается себестоимость.

3. Исходя из необходимости выбора формы сечения, сохранены прекрасные механические свойства проходческого щита моносечения.

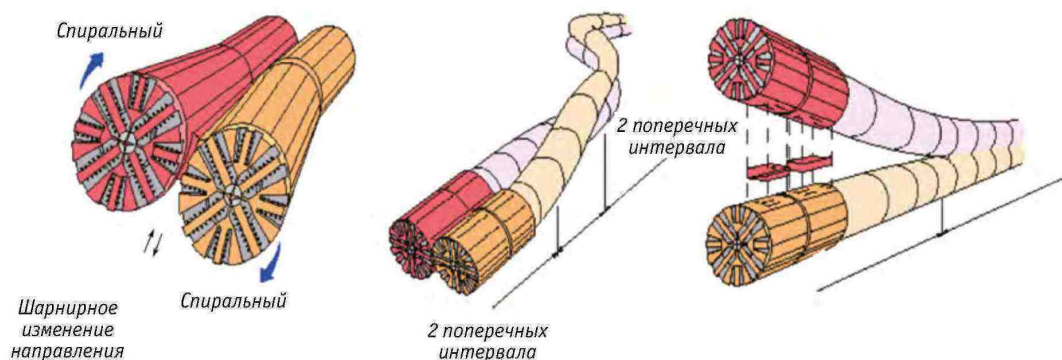


Рис. 2-13. Схема устройства проходческого щита H&V

4. При формировании сечения линии туннеля можно не принимать во внимание окружающие препятствия.

#### 5) Сферический проходческий щит

Данный метод использует сферический проходческий щит для ведения строительных работ, как показано на рис. 2-14. Особенностью данного проходческого щита является самовращение сферического тела. Сферическое тело спрятано внутрипереди идущей основной части проходческого щита, внутри сферического тела спроектирован еще один дополнительный проходческий щит. После того, как основной проходческий щит завершает первичные работы по расчищению грунта, вращение сферы изменяет направление туннеля, таким образом осуществляя последующий этап его разработки. Сферический проходческий щит подразделяется на непрерывно движущийся в двух плоскостях сферический проходческий щит (рис. 2-15) и на непрерывно горизонтально движущийся на дальние расстояния сферический проходческий щит (рис. 2-16).



Рис. 2-14. Сферический проходческий щит

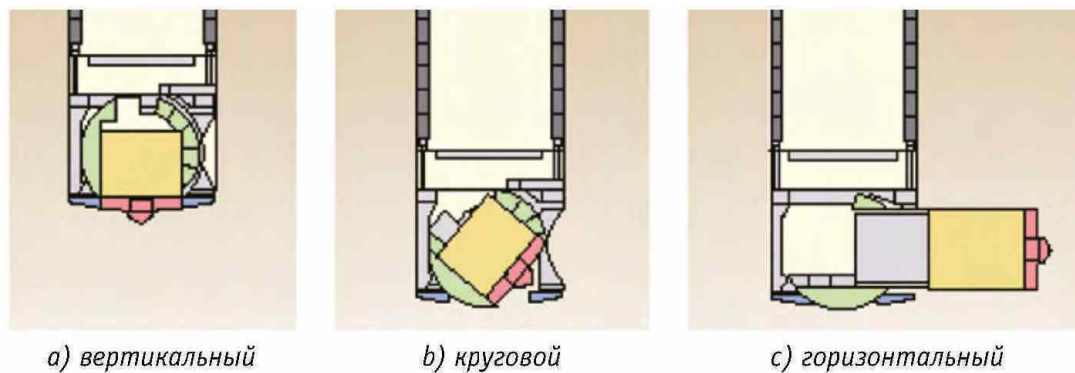


Рис. 2-15. Непрерывно движущийся в двух плоскостях сферический проходческий щит

Рассмотрим в краткие основные преимущества данного типа на примере продольно-поперечного сферического проходческого щита:

1. Из-за вертикального расположения рабочей шахты и горизонтального типа проходческого щита, туннель непрерывно разрабатывается дальше. Причина выбора такого типа щита – отсутствие необходимости обдумывать такие технические проблемы как придание жесткости грунту во время погружения и извлечения проходческого щита, утечка воды. При таком методе многократно увеличивается глубина рабочей шахты, повышается безопасность и темпы строительства. Данный тип щита оказывает значительное влияние на сокращение сроков строительства. 2. Влияние вертикально расположенной рабочей шахты на окружающую среду и проседание грунта меньше, по сравнению со стандартным методом проведения строительных работ.

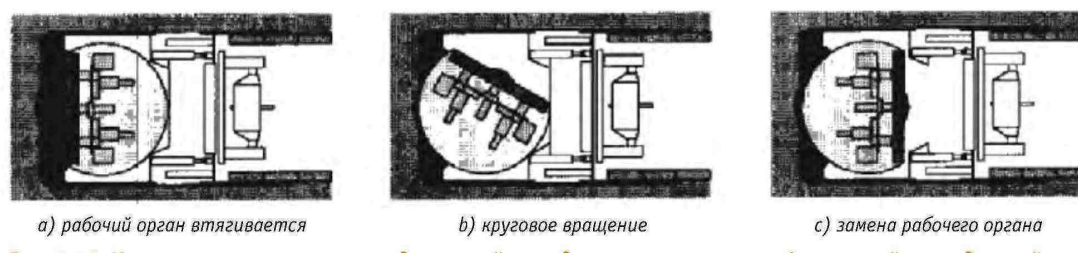


Рис. 2-16. Непрерывно горизонтально движущийся на дальние расстояния сферический проходческий щит

3. Внутреннее пространство и толщина стенок вертикально расположенной рабочей шахты уменьшены, что позволяет сэкономить на ее строительных затратах. 4. Удобный ремонт и замена фрез в процессе разработки туннелей, подходят для сооружения протяженных туннелей. 6) Проходческий щит DOT Бициклический проходческий щит (Double-O-Tube-Metod, сокращенно DOT) относится к одной из разновидностей инженерно-технического метода MF, показан на рис. 2-17. В отличие от метода MF, при данном методе для шламового проходческого щита применяются фрезы в форме спиц. Зубчатое колесо, на котором расположены две фрезы в одной плоскости, образуют проходческий щит для строительства туннелей при помощи бициклического метода. Находящиеся рядом фрезы не соприкасаются и не препятствуют друг другу в проведении работ, каждая из фрез вращается в противоположную сторону, таким образом, осуществляется синхронный контроль.



Рис. 2-17. Бициклический проходческий щит

Площадь выемки бициклического проходческого щита небольшая, поэтому глубина и ширина шахты могут быть уменьшены в процессе строительных работ. Сечения туннеля получаются разнообразными, круговые сечения могут выполняться слева, справа, сверху и снизу в соответствии с окружающими условиями и инженерными требованиями.

#### 7) Проходческий щит с локальным расширением пространства

Данный проходческий щит изображен на рис. 2-18. Проходческий щит с локальным расширением пространства способен провести производственные работы по локальному расширению сечения туннеля в любой его точке. Основные этапы строительного процесса включают нижеследующее:

1. Строительные работы на обычном участке. Вначале проводятся работы, характерные для сооружения туннеля, затем на участке, нуждающемся в расширении, устанавливают спе-

циальный тьюбинг, между обычным и специальным тьюбингами устанавливается направляющее кольцо.

2. Сооружение противодействующих опор для проходческого щита с локальным расширением пространства. Демонтаж ранее сооруженной нижней секторальной отделки блоками на особом участке. После установки ограждающей конструкции приступают к извлечению грунта. При необходимости можно прибегать к укреплению грунта на особом участке. При проходке щита заливаются противодействующие опоры.

3. Создание противодействующей несущей плиты для проходческого щита с локальным расширением пространства. При расширении значительных площадей в тьюбинг направляющего кольца устанавливается круглый проходческий щит, который по мере проходки укрупняет тьюбинг, в конце концов создавая противодействующую несущую плиту для проходческого щита (исходное основание).

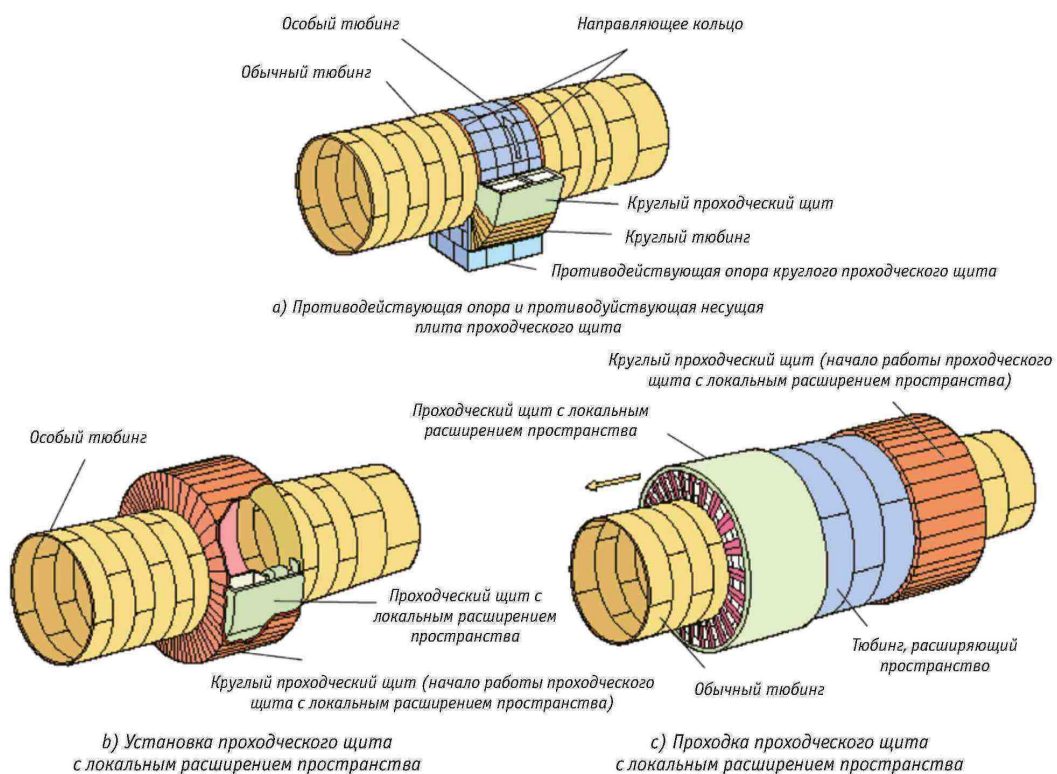


Рис. 2-18. Основные принципы проходческого щита с компрессионным сжатием грунта

4. Установка и проходка для проходческого щита с локальным расширением пространства. На исходном основании устанавливают проходческий щит с локальным расширением пространства, затем проводят значительную выемку грунта для расширения туннеля. Метод позволяет частично расширить туннель в любом месте и на любую длину в зависимости от применения, форма частично расширенного участка остается круглой, поэтому его механические свойства сохраняют лучшие характеристики круглого сечения. Доступно всестороннее нецентральное расширение участков в разных направлениях: сверху, снизу, справа, слева. Если сравнивать данный способ расширения участков со способом открытого котлована или другими, он позволяет в относительной степени снизить затраты и ускорить процесс строительства. Нет необходимости в создании строительной площадки и рабочего колодца, поэтому давление на окружающую среду является минимальным.

## **2. 4. РИСКИ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ИНЖЕНЕРНЫХ РАБОТ С ПОМОЩЬЮ ПРОХОДЧЕСКОГО ЩИТА**

### **2.4.1. Краткий обзор несчастных случаев при проведении инженерных работ с помощью проходческого щита**

Щитовая проходка является одним из самых передовых методов строительства подземных туннелей. С тех пор, как в 1825 году в Великобритании под рекой Темзой Марком Брюнелем был прорыт с помощью неавтоматического проходческого щита прямоугольного сечения первый туннель, по состоянию на 2018 год история применения и развития проходческих щитов насчитывает 193 года. В настоящее время метод щитовой проходки может применяться при строительстве практически в любых гидрогеологических условиях, в мягких или твердых грунтах, при содержании или отсутствии грунтовых вод в почвах, и даже в карстовых образованиях. Обычно в таких случаях допустимо применение проходческих щитов при проведении подземных работ (в особых случаях необходимо применение сопутствующих методов).

Для прокладки первого в мире туннеля с помощью щита, разработанного Брюнелем, потребовалось 18 лет (1825–1843 гг.), длина туннеля составила всего 458 м, при этом во время его строительства произошло пять крупных прорывов воды, во время которых погибло шесть человек. В настоящее время технология строительства туннелей с помощью щитов непрерывно развивается во многих странах мира, но при ее продвижении и применении произошел ряд производственных аварий, которые не только повлияли на график реализации проекта, но и привели к большим экономическим потерям и ненужным жертвам.

Щиты – это специальное оборудование, изготовленное «на заказ» с учетом конкретных особенностей, таких как инженерная геология, гидрогеология, геоморфология, поверхностные сооружения и подземные трубопроводы и сооружения. Данное оборудование является специализированным и отличается от обычного. Ключевыми характеристиками является не только электротехнический дизайн, но и адаптация к различным типам инженерной геологии, почвы являются основой туннельных работ с помощью проходческого щита. Успех строительства с помощью щита зависит в первую очередь от выбора типа щита и уровня квалификации персонала. Правильный выбор типа щита – залог успеха строительства, уровень квалификации персонала – источник успеха строительства.

В 1996 году во время строительства первой ветки метро Гуанчжоу произошло значительное оседание грунта и образование глинистой корки из-за низкой скорости и продвижения, а также сильного истирания фрез, неадаптированность щита к работе в выветрившихся породах привела к обрушению 3–4 зданий.

В 2000 году во время строительства тестового участка второй линии метро в Гуанчжоу пришлось заменить метод щитовой проходки. Из-за первоначально неразумного распределения фрез, фрезы выступали за орган рабочего щита, нарушая последовательность распределения, которое приводило к низкой скорости продвижения, вследствие недостаточного крутящего момента, а также к образованию глинистой корки.

20 ноября 2007 года в Нанкине при проведении работ на линии метро № 2 на участке ТАО4 между станциями Хэцунь и Юаньтун во время подхода проходческого щита к южной оконечности правой ветки, при заходе в шахту, на расстоянии двух метров от рабочего органа щита образовались четыре большие воронки с водой и песком, быстро увеличивающиеся в размерах. Персонал, работающий около входа в шахту, в срочном порядке эвакуировали. В результате был обрушен большой участок земли к югу от станции Юаньтун, зона продольного обрушения составила около 150 м, ширина зоны обрушения – около 20 м, максимальная глубина обрушения – около 6 м, щит остался в обрушенной почве.

6 мая 2011 года на участке между станциями Цзянгодао и Тяньцзинь второй линии метро в Тяньцзине шнековый механизм левой линии был выведен из строя скоплением цемента, на который наткнулся. Когда смотровое отверстие было открыто для проверки, из щели шнекового механизма хлынул поток воды с песком, что привело к обрушению грунта. Результатом явилась локальная деформация и растрескивание листов тубингов обеих линий, оба проходческих щита были завалены грунтом. С обеих сторон участка Цзяньтянь строительные работы были возобновлены с изменением направления прокладки туннеля, обошлось без человеческих жертв.

Примерно в 23:00 1 января 2015 года в Ухане на 19-м участке третьей линии метро между станциями Шимин чжицзя и Лунту дадао щит продвигался к кольцу 1122 на левой ветке, детектор газов щита подал сигнал о наличии ядовитых газов. После того, как руководитель строительных работ с помощью переносного детектора подтвердил наличие ядовитого газа, руководителями была организована полная эвакуация людей из туннеля. После этого руководители строительных работ и оператор проходческого щита повторно зашли в туннель с целью выявления дополнительных скрытых угроз. 1 января в 2.20 утра в туннеле прогремел взрыв, в результате которого погибли два человека.

12 февраля 2017 года в Сямыне во время проведения работ на второй линии в районе Хайдун в компрессионной камере понизилось давление и произошло возгорание щита. Трех пострадавших во время инцидента доставили в госпиталь, спасти их не удалось.

7 февраля 2018 года при строительстве первой очереди на 2 линии метро в городе Фошань на одном из участков между станциями Людаоху и Хуюн на правой линии произошел прорыв воды, что вызвало обрушение туннеля и дорожного покрытия, в результате чего 12 человек погибли и 8 получили ранения.

Подводя итоги, заметим, что несчастные случаи при строительстве с помощью проходческого щита происходят постоянно, поэтому необходимо провести анализ рисков работ, проводимых с помощью проходческих щитов. После проведения анализа необходимо разработать меры по предотвращению и контролю рисков при строительстве.

#### **2.4.2. Классификация рисков при строительстве с помощью проходческих щитов**

При анализе рисков строительства с помощью проходческого щита принимаются во внимание «сложность геологии», «приспособляемость проходческого щита», «ограниченные знания кадров», иррациональность методов и мер и другие составляющие. Слабые звенья становятся часто причиной несчастных случаев. Поэтому риски при строительстве щитов делятся на три основные категории: геологические риски, риски, связанные с оборудованием и антропогенные риски.

Причины основных рисков, влияющих на строительство с помощью проходческого щита:

(1) *Геологические риски* – 40%. Подробная геогидрологическая информация является определяющим фактором успеха строительного проекта. С помощью геогидрологической информации определяется целесообразность использования щита, выбор типа щита, его основные характеристики, выбор вспомогательного строительного оборудования и разработка планов действий в чрезвычайных ситуациях.

(2) *Риски, связанные с оборудованием*, – 30%. Ключевым фактором успеха строительства с использованием проходческого щита является специализирующийся на производстве щитов поставщик, обладающий передовыми технологиями, значительным опытом и надежностью продукции. Щиты требуют профессионального изготовления и обслуживания. Специализированное производство включает в себя передовые технологии и надежное качество. Только при условии использования передовых технологий в производстве, строительство может считаться наиболее безопасным, производительность высокой, что является решающими факторами при

соблюдении сроков строительства. Профессиональный сервис включает в себя богатый опыт и специализированное обслуживание. Рискам при строительстве туннелей противостоит богатый опыт, поэтому производители проходческих щитов должны им обладать. Сервисное обслуживание подразумевает техническую поддержку и своевременную поставку запчастей.

(3) *Антропогенные риски – 30%*. Опытная, грамотно управляемая, профессиональная и эффективная строительная команда является основополагающим фактором успеха строительства методом щитовой проходки. Рискам при строительстве туннелей противостоит богатый опыт, поэтому главным требованием к команде строителей является обладание им. Сжатые сроки реализации проекта строительства с помощью щита требуют управления на научной основе, чтобы в полной мере использовать его эффективность, уменьшить затраты и получить максимальную пользу. Именно поэтому необходимо управление на научной основе. График этапов строительства распланирован очень плотно, эффективные передовые проходческие щиты требуют кадров соответствующего уровня. Кадры являются одним из основных факторов, гарантирующих безопасность, качество и соблюдение сроков строительства, поэтому требуется профессиональная и эффективная команда строителей.

1) Классифицируются три вида рисков при строительстве с помощью проходческих щитов:

*(1) Геологические риски.*

Основные геологические риски при строительстве с помощью проходческих щитов следующие:

1) Композитные пласты (в основном распространены в Гуанчжоу, Шэньчжэне, Нанкине и т. д.).

2) Богатые водой зоны разломов и дробления (в основном распространены в Гуанчжоу и Нанкине).

3) Карстовые пещеры и земляные гроты (в основном распространены в северной части Гуанчжоу, Фошане, северной части Шэньчжэня и т. д.).

4) Крайне абразивные кремнистые и железистые обломочные породы; (в основном распространены в Гуанчжоу, Нанкине и других районах).

5) Пласты мелкого песка, содержащие водонапорные пласты (в основном распространены в Гуанчжоу, Фошане, Шанхае, Нанкине, Сучжоу, Ханчжоу и т. д.).

6) Почвы с содержанием угля и газа (в основном распространены в Гуанчжоу, западной и южной частях, Ханчжоу, Ухане и т. д.).

7) Сфероидальные, решетчатые или твердые породы с эрозией (в основном распространены в восточной части Гуанчжоу, Шэньчжэне, Нанкине и Пекине).

8) Песчано-гравийные пласты (в основном распространены в районах Шэньяня, Пекина, Чэнду, Наньнина, Наньчана, Сианя и Гуанчжоу).

9) Вязкие почвы и аргиллиты с глинистой коркой, чередование слоев песчаников и аргиллитов – рыхлая почва (в основном в Чунцине, Гуанчжоу, Шэньчжэне, Наньчане, Хэфэе и других районах).

*(2) Риски, связанные с оборудованием.*

Основные риски, связанные с оборудованием при строительстве с помощью проходческих щитов следующие:

1) Нерациональный выбор типа щита или его функциональные дефекты, в основном возникающие из-за ошибки в выборе типа. При неправильной конфигурации фрез и выборе их формы, остатки почвы застревают в установке, сразу же блокируют систему, под давлением просачиваются в тело щита.

2) Имеются повреждения коренного подшипника или герметизации.

3) Повреждения забойного органа щита (поломка, трещина, износ), износ фрез.

4) Повреждение коробки редуктора или системы зубчатой передачи.

*(3) Антропогенные риски.*

Основные антропогенные риски при строительстве с помощью проходческих щитов следующие:

- 1) Ограниченность сознания, проявляющаяся в невозможности всесторонне понять изменчивый характер почвы и рабочие характеристики щита.
- 2) Слабая организация строительства и низкое чувство ответственности.
- 3) Нерациональный проект строительных работ и проводимых мероприятий.
- 2) Из всего перечисленного можно выделить 11 основных рисков щитового строительства:

*(1) Точность геологического исследования.*

Точность геологического исследования особенно важна при строительстве туннелей с помощью проходческих щитов. Точное геологическое исследование строительного участка туннеля является решающим фактором при выборе типа щита. Горизонт почвенных вод, прочность горной породы при сжатии и физические свойства почвенного слоя определяют выбор типа и конфигурацию щита. В настоящее время при проведении геологоразведочных работ чаще всего через каждые 30 м производится наметка под отверстие, но в зависимости от требований интервал может быть сокращен до 10 м (геологические риски).

*(2) Геологическая пригодность щита.*

Геологическая пригодность щита оценивается экспертами до начала строительства, чтобы убедиться, что щит соответствует требованиям проекта. Выбирается тип щита с гидропригрузом или грунтопригрузом, конструкция рабочего органа щита и фрез, двигательная система, возможности маневрирования и т. д. Выбор типа щита является ключевым вопросом в строительстве с помощью проходческого щита (риски, связанные с оборудованием).

*(3) Вход и выход проходческого щита.*

Вход и выход щита является вопросом, требующим решения в первую очередь в процессе строительства. Входную область необходимо укрепить арматурой согласно требованиям проекта, после этого необходимо проверить результаты укрепления и его равность через скважину. Только после удовлетворения необходимых требований можно приступить к операциям с входом щита. При входе щита (достижении определенной точки ил приеме) процедура та же. Если же результаты укрепления не удовлетворительные, не стоит проводить операции по входу и выходу щита, это может привести к обрушению отверстия. Входное и выходное отверстия для щита должны быть усилены так, чтобы соответствовать проектным требованиям по прочности, ширине, длине и глубине. Контроль за положением щита также необходим для плавного входа и выхода щита (на первый взгляд – геологический риск, но на самом деле это антропогенный риск).

*(4) Устойчивость забоя.*

Важным показателем того, насколько хорошо построен туннель, является степень его воздействия на окружающую среду, и это особенно проявляется при прокладке туннелей в городских районах, где контроль за выемкой грунта в процессе строительства является ключевой технологией, влияющей на его качество. Если опорное давление слишком низкое, большое количество грунта забоя попадет в камеру давления, вызывая чрезмерное оседание грунта и даже его обрушение. Если опорное давление слишком высокое, оно легко вызовет поднятие поверхности, что негативно повлияет на сооружения в округе. В то же время среда в напорной камере подвержена колебаниям опорного давления из-за ранее существовавших стратиграфических условий, происходит дополнительное влияние на устойчивость забоя (геологический риск + антропогенный риск).

*(5) Нарушение герметизации в хвостовой части щита.*

Вероятность возникновения риска разрушения при нарушении герметизации в хвостовой части щита считается низкой, но если нарушение произойдет, то может иметь серьезные

последствия, если своевременно не принять меры. Если глинистая вода проникнет в туннель через щель в уплотнении хвостовой части щита, произойдет сильная осадка грунта из-за вымывания. Если работы будут проводиться под рекой, произошедший обвал дна может повлиять на строительства всего туннеля. Поэтому, если такой риск возникает, необходимо принять эффективные контрмеры для его устранения. Если строительство ведется под водой, то при необходимости применяют метод замораживания для восстановления герметичности (риски, связанные с оборудованием).

*(6) Проходка на твердых и слабых грунтах.*

Крайне трудно контролировать расположение туннелепроходческого щита при выполнении работ в твердых и слабых грунтах, которые разнятся между собой по различным характеристикам. В соответствии с геологическими особенностями можно контролировать работу гидроцилиндра, в твердых участках добавить давление, в участках со слабым грунтом, наоборот, убавить.

*(7) Замена ножей под сооружениями.*

Замена ножевой части под сооружениями составляет определенную сложность. При преодолении нижней части сооружений по правилам необходимо быстро пройти проходческому щиту о своевременно бетонировать, чтобы снизить возможность обвала сооружений.

*(8) Стратиграфический перерыв и неравномерная седиментация.*

При проходке щитом риски стратиграфического перерыва и неравномерной седиментации главным образом вызваны избыточной экскавации. Контролируя количество разрабатываемого грунта, можно снизить возможность возникновения данных рисков, контролируя улучшение остатков почвы, уменьшая эрозию почвы, контролируя неравномерную седиментацию пластов (искусственные риски).

*(9) Наличие преград во время забоя (валуны и т. д.).*

Наличие подземных преград может негативно повлиять на проходку щита: во-первых, может быть доставлен ущерб резцовой головке и ножевой части, поэтому невозможно производить забой, что повлияет на строительные сроки. Если резцовая головка сломается, то для его замены нужно будет тратить дополнительные средства, а также из-за особенных подземных условий добавляет трудностей произвести данную замену; во-вторых, появление преград может привести к внезапному увеличению крутящего момента, что повлечет за собой поломку главного привода. Причинами таких поломок являются неполнота проведенных изысканий, не до конца собранные материалы.

*(10) При производстве работ в речных условиях земляное покрытие маленькое, давление воды большое, возможность поднятия самого туннеля большая, необходимо предотвратить излишнюю приподнятость.* Это можно сделать, увеличив вес в самом туннеле или надавить на поверхность земли (геологические риски + риски человеческого фактора).

Факторами всплытия тьюбинга является положение щита и тьюбинга, движущаяся сила гребного гидроцилиндра, состав и давление при синхронной цементации, характеристики соединения тьюбинга и т. д.

1. Положение щита: ось щита относительно оси туннеля наклоняется, тьюбинг подвергнется большой эксцентричной нагрузке и усилию вверх из хвоста щита, преимущественно принимать на себя воздействие характеристики пластов, уровня эксплуатации щита, продольного уклона туннеля и т. д.

2. Продольная жесткость туннеля: продольная жесткость тьюбинга и тип соединения тьюбинга, способ сборки и др.

3. Длина не затвердевшего участка суспензии и плавучесть суспензии на сегменте: длина не затвердевшего участка суспензии зависит от времени затвердевания суспензии и скорости строительства. Плавучесть суспензии на на сегмент в основном влияют свойства жидкого навоза (вязкость, осадка и т. д.) и условия грунтовых вод. В соответствии с реальной ситуацией

очень сложно определить время затвердевания суспензии и величину плавучести суспензии на сегменте.

4. Свойства пласта и состояние грунтовых вод: чем слабее пласт, тем меньше коэффициент сопротивления пласта, тем легче сегменту деформироваться; чем слабее пласт, тем хуже водопроницаемость и избыточное давление поровой воды вероятно, и сегмент выдержит большую плавучесть. Если богатый водой пласт имеет высокую водопроницаемость, грунтовые воды будут разбавлять суспензию, влияя на время ее гелеобразования и свойства суспензии.

Принятые меры:

1. Использование раствора с регулируемым временем гелеобразования или затвердевающего раствора с большим содержанием песка (при синхронной затирке обычно используется инертный раствор, который имеет большой объем утечки и не обладает прочностью, что приведет к всплыванию сегмента и в последующем этапе строительства туннеля образуется большой осадок, трещины в грунте дома и другие последствия).

2. Соответствующая форма стыка должна быть принята в соответствии с условиями пласта.

3. Контролируйте положение щита.

4. В соответствии с измеренным подъемом туннеля во время процесса продвижения, чтобы гарантировать, что отклонение оси туннеля контролируется в пределах допустимого диапазона, ось выемки туннеля может быть соответственно ниже проектной средней линии туннеля.

5. Затемнение трех сегментов кольца в задней части хвостовика экрана (двойной жидкий раствор каждые 3–5 колец) используется для уменьшения плавучести туннеля.

*(11) Застревание щита.*

В процессе проходки щита из-за изменений пластового давления грунт вокруг щита сжимается, вызывая чрезмерное трение между кожухом щита и почвой и заторы щита (геологический риск + риск оборудования).

Наиболее часто встречающиеся феномены застревания щита это застревание хвоста. Можно проектировать комплект контуров нагнетания для шарнирной системы щита, чтобы увеличивать растяжение гидроцилиндра к хвосту щита.

#### **2.4.3. Система предотвращения рисков «Три начала и четыре умения»**

При производстве работ туннелепроходческим щитом необходимо придерживаться концепта «Три начала и четыре умения», под которым подразумевается: «начинать работы с геологических изысканий и контролировать риски при производстве работ щитовой проходкой; начинать с раскрытия потенциала щита и спланировать ключевые позиции щитовой проходки; начинать содействие эффективному результату с научного менеджмента и раскрывать передовые особенности щитовой проходки». Это делается с целью обеспечить «умение проникнуть, устоять, выйти и выдержать» щитовой проходки при производстве работ. Данный принцип описан на *рис. 2-19*.

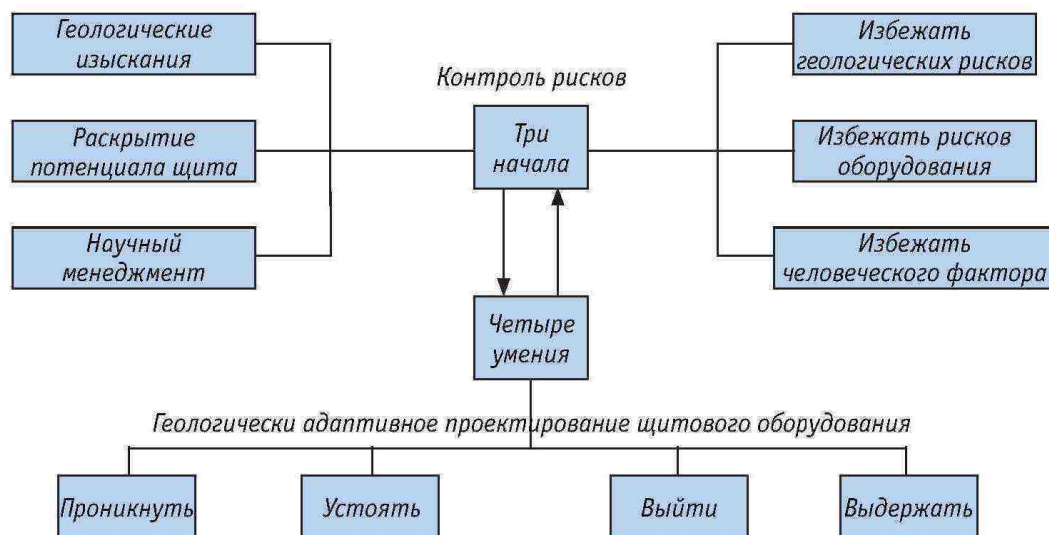


Рис. 2-19. Концепция «Три начала и четыре умения»

При производстве работ бывают риски геологические, производственные и связанные с человеческим фактором. Необходимо усиливать геологические изыскания и проводить дополнительные работы, чтобы «уйти» от геологических рисков; с помощью геологической адаптации проходческого оборудования спрогнозировать риски; с помощью профессиональных контрольных мер и научного менеджмента обойти риски, вызванные человеческим фактором. Другими словами «Три начала» ключевых технологий проходки означают: «начинать работы с геологических изысканий, начинать с раскрытия потенциала щита, начинать содействие эффективному результату с научного менеджмента».

Помимо вышесказанного, щитовая проходка – это особенное оборудование, а проектирование геологической адаптации данного устройства является ключевым фактором при выполнении или невыполнении работ. Выбор проходческого щита должен быть детально спроектирован в соответствии с конкретными инженерно-геологическими и гидрометеорологическими условиями. Ключевой является способность адаптации к геологическим условиям проходческого щита, необходимо удостовериться, чтобы спроектированное оборудование при производстве работ отвечало требованиям «умение проникнуть, устоять, выйти и выдержать», что и является принципом «четырех умений» ключевых технологий проходки.

#### 1) Умение проходить.

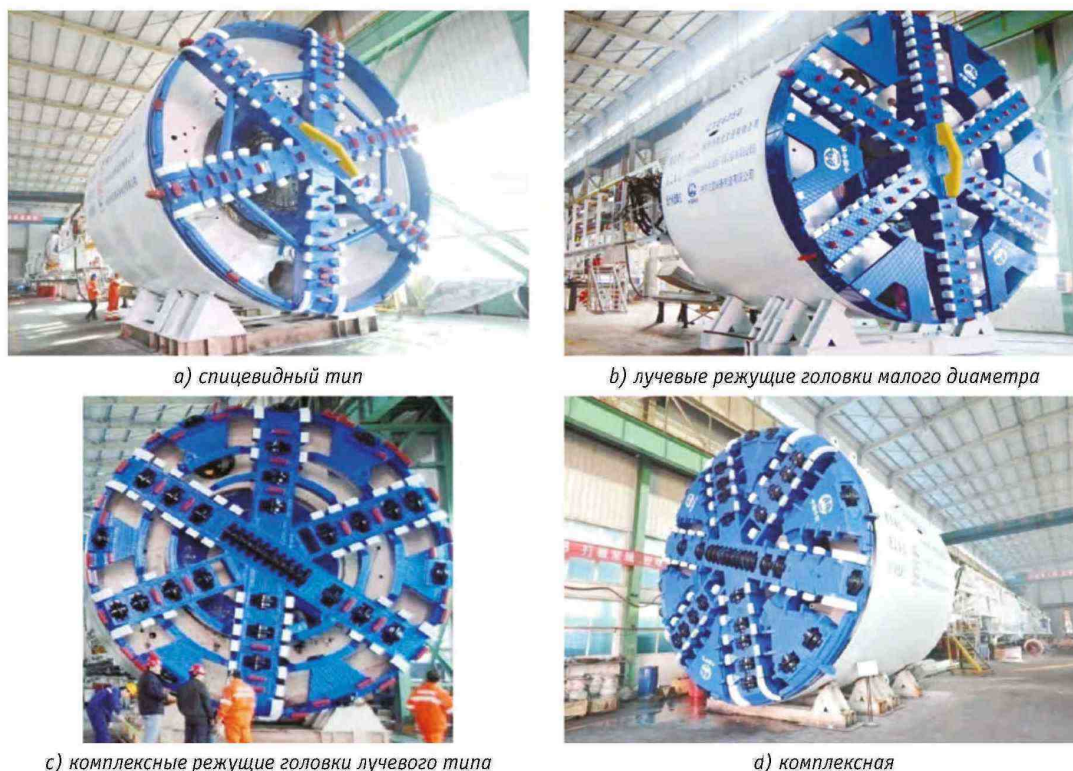
Режущее устройство и головная часть щита должны обладать геологической направленностью, при проектировании головной части, выборе и расположении ножей необходимо подходить с рационализмом.

Структура ротора (рабочего органа) и компоновка ножей должны быть четко спроектированы. В песочных, гравийных грунтах и слоях с галькой малой фракции лучше применять режущие головки спицевидного типа (лучевого), как показано на рис. 2-20а. Степень открытости для такого вида режущих головок достаточно большая (70–75%), это удобно для контроля грунтопригруза и это уменьшает износ режущих головок; расположение режущих головок по уровню, увеличивает размер сплава, чтобы усилить его устойчивость удара. В глинистых грунтах лучше использовать лучевые режущие головки малого диаметра, как показано на рис. 2-20б. В глинистых слоях возможно образование глинистой корки, а режущие головки лучевого типа малого диаметра обладают в центре опорной конструкцией из труб, что помогает в снижении формирования глинистой корки. В слоях с гравием больших фракций лучше использовать комплексные режущие головки лучевого типа, как показано на рис. 2-20с. Износ рез-

цовой головке от таких геологических слоев большой, поскольку гравии большого диаметра не просто промолоть, а лучевые конструкции способствуют уменьшению крутящего момента, большая степень открытости помогает выбросу гравия. Применение вращающихся фрез может сыграть перемалывающую роль (перемалывание вместе с выбросом), одновременно с этим добавляет изнosoустойчивость режущим головкам. В скальных слоях лучше использовать комплексную режцовую головку, как показано на *рис. 2-20d*, поскольку она обладает достаточно большой перемалывающей способностью.

Китай – это страна с обширной территорией и со сложной геологической системой. Потому через классификацию геологических перегонов строительства проходческим щитом, обобщение типичных вопросов в части «возможности проходки» при строительстве проходческим щитом, через анализ характеристики различных земляных пластов и в сочетании с типичными вопросами при проходке эффективность работ имеет большую зависимость от разных компоновок ножей для разных пластов.

В соответствии с геологическими материалами, районы в Китае по разрушаемости рабочего органа проходческого щита делятся на четыре группы: чрезвычайно повышенного урона, повышенного урона, среднего урона и низкого урона, как показано на *рис. 2-21*. Крайне легко разрушаемые районы включают в себя: Пекин, Гуанчжоу, Чэнду, Шэньчжэнь. Легкоразрушаемые: Шэньян, Сямэнь, Ухань, Фучжоу, Харбин, Далянь, Чанша, Наньнин, Куньмин, Нанкин, Дунгуан, Урумчи. Средней степени разрушаемости: Наньчан, Сиань, Тайюань, Нинбо, Ланьчжоу, Хэфэй; низкого уровня разрушаемости: Шанхай, Тяньцзинь, Чжэнчжоу, Чанчунь, Сучжоу, Ханчжоу, Шицзячжуан, Уси, Гуйян, Чанчжоу, Вэньчжоу, Сюйчжоу, Цзинань.



*Рис. 2-20. Рабочие органы для различных слоев*

Районы с высоким содержанием окатанного гравия, верхние слои которых слабые, нижнетвердые, крайнетвердый слой и выветрелый пласт со сферической формы гранитом и другие

сложные геологические слои относятся к зонам чрезвычайно повышенного урона. В данных районах содержание гравия превышает 50%, внутренний угол трения превышает или равняется  $35^\circ$ , содержание кварца высокое, находятся валуны с большими фракциями и высокой прочностью, предельная прочность при одноосном сжатии превышает 150 МПа. Среди потерь эффективности резцовой головки можно выделить следующие: повреждение вращающихся фрез, резцов, скребков, зубчатых ножей и центрального ножа. На резцовой головке должны быть вращающиеся фрезы, резцы, боковые скребковые установки и передние ножи, необходимо увеличить степень открытости, чтобы гравий после перемалывания проходил через резцовую головку, тем самым снизить износ режущих головок.

Зоны повышенного урона включают в себя широко распространенные гальку и круглую гальку, содержание гравия ниже 50%, внутренний угол трения  $30\text{--}35^\circ$ , высокое содержание кварца, с прослойками валунов, достаточно высокая предельная прочность при одноосном сжатии горных пород (больше или равно 100 МПа). Резцовой головке, снабженной вращающимися фрезами или резцами, необходимо увеличить степень открытости, тем самым позволяя проходить через кольцо породам с большими фракциями, чтобы снизить износ ножей.

В зонах со средним уровнем содержания гравия средней фракции 20–30%; высокое содержание глинистых частиц в пылеватом глинистом слое, поэтому легко может образоваться глиняная корка в центре рабочего органа, тем самым подвергнуть оборудование клинообразному износу. Среди потерь эффективности резцовой головки в таких районах можно выделить следующие: клинообразный износ вращающихся фрез, разрыв ножевого кольца, опадение скребковой установки. В данных районах на резцовой головке должны быть главным образом резцы и скребки, иногда вращающиеся резцы, благодаря корректировке степени открытости можно осуществить проход гравия больших фракций через резцовую головку, тем самым снизить урон режущим головкам.

В районах с низким износом содержатся главным образом глинистые грунты, которые очень часто однородны и редко содержат или вообще не содержат крупнозернистый грунт, галька может быть заложена очень глубоко. Проходческий щит в таких грунтах легко разрабатывает породы и продвигается вперед, его нагрузки равномерно распределены. В этом районе возникают глинистые корки в центре резцовой головки, клинообразные износы ножей. Главным образом среди ножей встречаются скребки. Часто при производстве работ применяются материалы, улучшающие свойства грунтов, чтобы избежать формирования глинистой корки и потери стабильности при разработке пород, тем самым снижая риск возможного урона режущим ножам.

Одновременно с контролем производства работ необходимо отрегулировать параметры проходки в соответствии с геологическими условиями. При «слепой» или «своевольной» проходке возможно нанесение ущерба оборудованию, а также возникновение поломок.

## *2) Умение выбросить.*

При осуществлении проходки необходимо рационально спроектировать винтовой конвейер (для ТПМК с грунтопригрузом) и системы разделения бетонного раствора (ТПМК с гидропригрузом). Эффективность производства работ проходкой не только заключается в эффективности разработки пород резцовой головкой, но также обретает ключевую важность и возможность быстро вывести разработанный грунт, поэтому при проектировании щита необходимо полноценно продумать способ шлакоудаления. Например, в водонасыщенных слоях лучше применять шнековый транспортер осевого типа (в нижней части или в хвосте находится затворка, откуда выбрасывается разработанный грунт). При большом количестве разработанного грунта можно не использовать ленточный конвейер для выброса, а взамен применять систему перекачки разработанного грунта с поддержкой давления; в слабых и песчаных грунтах использовать лучше шнековый транспортер осевого типа (в нижней части находится затворка, откуда выбрасывается разработанный грунт); в слоях с гравием больших фракций

можно применять ленточный шнек для выброса грунта. С этой точки зрения улучшение разработанного грунта, циркуляция глиняной смеси и смыв будут играть ключевую роль.

*3) Умение устоять.*

При производстве работ щитовой проходкой главными условиями являются устойчивость забоя и обеспечение согласованности между давлением пригруза и давлением воды в геологических слоях. Недостаток и колебания давления пригруза часто являются причинами обрушения забоя. Чтобы обеспечить устойчивость забоя, необходимо обладать системой улучшения разработанного грунта, в которую входят система пеногенерирования, система бентонитовой глины, система добавления глинистого раствора, система полимеров.

Система пенного впрыскивания часто используется на грунтах с повышенным содержанием мелкозернистых частиц, например, на глинистых породах. Целью данного метода является повышение текучести, водоудерживающей способности разработанного грунта; если выражаться более точно, то разработанный грунт после улучшения собственных свойств обладает более надежным текучим свойством, снижаются при этом риски формирования глинистой корки и утекания воды в геологических слоях, а также уменьшается крутящий момент резцовой головки.

Система впрыскивания бентонитовой глины обычно используется в грунтах с сравнительно небольшим содержанием мелкозернистых частиц, например, в породах с окатанным гравием. Целью данного метода является увеличение отношения содержания мелкозернистых частиц, улучшая тем самым текучесть и водонепроницаемость грунта; также данный способ помогает разработанному грунту обладать более надежным текучим свойством, снижаются при этом утеkanie воды в слоях и крутящий момент. При впрыскивании необходимо применять достаточно хорошие материалы, четко определить время разбухания, чтобы достичь нужного эффекта.

Система добавления глины используется при проходке водонасыщенных пластов. Особенно при производстве работ в речных и морских районах для улучшения адаптации туннелепроходческого комплекса применяется система, которая направлена на трансформацию функциональности щита с гидропригрузом, может использоваться для улучшения выброса грунта и предотвращения обильного фонтанирования.

Система впрыскивания полимеров пригодна для неглинистых грунтов, часто применяется в водонасыщенных породах с окатанным гравием. Целью данного метода является схватывание водных компонентов, снижение разделения воды и грунта, увеличение сцепления. Также данный способ помогает разработанному грунту обладать более надежным текучим свойством, снижаются при этом утеkanie воды в слоях и крутящий момент.

*4) Умение сдерживать.*

Долгосрочная перспектива туннеля основывается главным образом на качестве тюбинга, обработке сварного соединения и сборки тюбинга. При производстве работ качество сборки тюбинга должно быть на высоте, необходимо строго контролировать вертикальное смещение, одновременно с этим нужно избежать появления трещин и нанесения урона тюбингу из-за большой нагрузки. Что касается сварного соединения, то необходимо предотвратить ущерб гидрошпонки или ее выход из строя, например, необходимо предотвратить разбухание гидрошпонки на раннем этапе; необходимо точно смонтировать ее, при проходке туннеля необходимо обладать достаточной силой толкания и кольцевой силой сжатия, чтобы гарантировать оптимальную водосдерживающую способность гидрошпонки.

## **2.5. ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ ЩИТОВОЙ ПРОХОДКИ**

Техника щитовой проходки стремительно развивается, ниже приведены основные тенденции развития:

*(1) Максимум вызовов.*

1. Еще больший диаметр: диаметр туннелепроходческого щита становится все больше и больше. Территория Китая обширна, различные реки текут вдоль и поперек, во многих городах ведутся работы вдоль течения, а иногда и через реки. Вместе с бурным развитием китайской экономики в геометрической прогрессии растет спрос на городские и железнодорожные коммуникации, коммуникационные туннели для пересечения рек и морей, но одновременно с этим все сложнее в городских условиях найти пространство для постройки мостов. Со временем на железной дороге увеличивается скорость поездов, чтобы уменьшить занимаемую территорию, двухпутные туннели являются направлением развития; автомобильные дороги: повышается категория дорог, поток машин все больше и больше, что влечет за собой постоянное увеличение сечения туннелей; при таких тенденциях появляется все больше и больше работ, где задействован проходческий щит большого диаметра.

2. Туннели еще длиннее: длина туннелей со временем увеличивается.

3. Еще более высокое давление воды: возникает все больше и больше туннелей, которые преодолевают водное пространство, поэтому требования к герметизации и водному давлению, которое несет проходческая установка, все выше и выше.

4. Еще глубже: необходимо избегать прокладывания маршрута на перекрещивании грунтов и скальных пород, трудно выполнять работы при условиях, когда верхние слои – мягкие грунты, а нижние – твердые. Необходимо по максимуму применять проходку в однородных породах, поэтому при выборе маршрута глубина заложения становится все больше.

5. Еще более высокая скорость проходки: скорость проходки становится все выше и выше.

6. Более запутанные геологические условия: возникают требования к адаптации все более сложных геологических условий.

*(2) Более безопасно и экологично.*

При производстве работ щитовой проходке все больше внимания уделяется экологии и безопасности.

*(3) Более сложные функции, простое управления, проектирование более гуманно.*

Требования к трудоемкости все ниже; все выше требования к качествам операторов.

*(4) Более продолжительный срок эксплуатации.*

Продвижение вперед технологий, надежный и долгий срок эксплуатации щита являются одним из ключевых факторов при гарантировании сроков строительства, а также ключевым фактором успеха производства.

*(5) Повышенная адаптация к геологическим условиям.*

В сложных условиях проходческий щит может преодолевать как скальные грунты, так и мягкие грунты и породы с гравием. При проектировании требуется от резцовой головки адаптация к различным слоям.

*(6) Цифровизация проектирования проходческого щита, модулизация производства, интеллектуализация управления и повышение знаний сервиса услуг.*

Подобно автомобилям без водителя, развитие технологий щитовой проходки идет в сторону цифровизации, интеллектуализации и управления без человека, осуществляется автоматическая интеллектуальная проходка и менеджмент. В дальней перспективе китайские технологии проходки – это оцифрованное проектирование, интеллектуализированная проходка, менеджмент удаленного типа. То есть введя геологические данные и параметры конструкции туннеля можно спроектировать туннелепроходческий комплекс, подходящий под инженерно-геологические и гидрометеорологические условия; производство работ реализуется через интеллектуальную проходку без операторов, это делается удаленно в офисе, контролируя производственный процесс. В офисе можно получить прямо на экране компьютера изображение с места производства работ и технические параметры щита, а также отдать приказ

для управления проходкой. Технические специалисты нужны лишь в офисе, чтобы управлять всеми комплексами, распространенными по всему миру.

## **ГЛАВА 3. КЛЮЧЕВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ ПО МЕТОДУ ЩИТОВОЙ ПРОХОДКИ**

### **3.1. ТЕХНОЛОГИИ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ИЗЫСКАНИЙ**

Цель геологических изысканий заключается в исследовании инженерно-геологических и гидрометеорологических условий там, где будет располагаться туннель, а также в определении влияния производства работ и эксплуатации туннеля на сохранность окружающей среды. Это делается, чтобы предоставить необходимые изыскательские материалы для планирования, проектирования и производства работ, а также чтобы провести анализ существующих горных пород и окружающей среды и выдать рациональные проект проектирования и меры производства работ, тем самым обеспечив экономичное, безопасное и надежное производство работ. Этап изысканий должен быть совмещен с этапом проектирования, обычно изыскания подразделяются на три этапа: ТЭО, первоначальные изыскания и подробные изыскания.

#### **3.1.1. Способы туннельных изысканий**

Туннельные изыскания главным образом включают в себя коллекционирование и исследование имеющихся материалов; исследования, съемку и изыскания; испытания и длительное наблюдение и другие виды. Вместе с развитием науки применяются все новые технологии в изыскательских работах. Целью изысканий является обеспечение безопасного, быстрого и экономичного производства работ методом щитовой проходки. Изыскания можно разделить на общие исследования, исследования преград, изыскания рельефа и геологические изыскания. Благодаря изысканиям можно получить основную документацию, которая понадобится на каждом этапе планирования, проектирования, производства работ и менеджмента эксплуатации. Результаты изысканий также необходимы для выбора местоположения туннеля и маршрута, являются доказательной базой для проведения МОС и способов осуществления работ, определяют масштаб производства. Поэтому при изыскательских работах необходимо полноценно продумать и реализовать вышеуказанные пункты.

##### *1) Общие исследования*

Главным образом под общими исследованиями понимается исследование текущей обстановки и планирования грунтов, дорожных коммуникаций, защиты окружающей среды и архитектурных находок, подземных вод, производственной площадки, электричества и воды и других условий окружающей среды. Общие исследования ориентированы на изыскания окружающих мест, которые находятся вблизи от проходящего маршрута, главным образом изыскания проводятся для прокладывания маршрута, проведения технико-экономического обоснования и утверждения масштабов строительства.

Исследования текущей обстановки и планировки территории подразумевают под собой использование и планирование с/х земель, горных лесов и водоемов в соответствии с имеющимися картами и проведением изысканий по месту. В городских районах необходимо обратить особое внимание на планирование территории в изучаемом районе (жилые здания, бизнес, индустрия), текущей обстановки, имущественных прав, масштабы производства, ограничительные условия. Необходимо полноценно овладеть различными подземными и надземными факторами, а также хорошо продумать маршрут, проектирование и производство работ.

При производстве работ под землей проходческим щитом необходимо провести изыскания по интенсивности движения, полосе отведения, ограничениям во время обратной засыпки, разработке дорожной одежды. При производстве работ велико влияние расположения вертикальных шахт на дорожные коммуникации. При выборе расположения необходимо полностью продумать функциональность шахты, проходимость потока транспортных средств, расположе-

ние площадки, транспортировку и обработку шлака, транспортировку материалов и оборудования и других условий. Изыскания поверхностных воды подразумевают изыскания профилей водоемов (рек, озер и т. д.), конструкции защитных дамб, геологических условий, мостов, водной охранной зоны, водного транспорта и т. д.

Щитовая проходка предъявляет достаточно высокие требования к строительной площадке, использованию воды и электричества. Необходимо провести полноценное исследование по поводу условий поставки.

Изыскания охраны окружающей среды направлены на изучение всевозможных влияний щитовой проходки на окружающую среду, перед началом и в процессе производства работ необходимо провести различные изыскания.

При возникновении потребности на некоторых объектах по окончании работ все еще проводятся дополнительные проверки, чтобы овладеть влиянием на окружающую среду, которое включает в себя: шумные звуки и вибрация, деформация фундамента, содержание вредных веществ в болотных газах и газах с недостатком кислорода, химическое бетонирование, обработка и транспортировка шлака.

## *2) Объект изысканий*

Геологические изыскания должны включать в себя наземные и подземные сооружения, подземные установки, водные скважины и старые скважины, остатки строительных и временных зданий и сооружений и другие объекты.

(1) Что касается наземных сооружений, то нужно провести изыскания формы строения (если квартирная постройка, то необходимо проверить материал, из которого выполнена данная конструкция; если мостовая конструкция, то нужно проверить статически определяемая или статически неопределяемая и т. д.), тип фундамента, заложен ли под землей фундамент, есть ли подвальное или цокольное помещение. Что касается подземных сооружений (подземная парковка, подземный ТЦ, метро и т. д.), то необходимо исследовать тип конструкции, глубину заложения фундамента сооружения и др. Также важным фактором является исследование условий эксплуатации данных сооружений, особенно нужно провести детальные изыскания в отношении сооружений, снабженных точными приборами.

(2) Что касается наземных и подземных водопроводов, электрических кабелей, кабелей связи и других подземных предметов, то необходимо провести предварительное исследование о том, как проложены те или иные коммуникации, нужно полноценно изучить все о будущем месте заложения вертикальной скважины. Помимо прочтения необходимых технических документов, имеющих у руководства, также нужно по месту с помощью пробного шурфа или геологических радаров и других поисковых устройств проверить актуальное местоположение, масштаб, глубину заложения, состояние и другие условия коммуникаций.

(3) Что касается водных скважин и старых колодцев, то необходимо удостовериться, не будут ли возникать в процессе щитовой проходки такие риски, как извержение, недостаток кислорода и др. По сравнению с другими видами щитовой проходки при использовании щита со сжатым воздухом гораздо больше сфера изысканий, которая может содержать расположение водной скважины, ее глубину и использование; наличие недостатка кислорода, степень недостатка и др. При наличии возможности загрязнения или недостаточно высокого уровня воды необходимо проверить изменения уровня воды за год и физические свойства воды. При исследовании старых скважин нужно, опираясь на материалы от владельца, проверить, нет ли несоответствий.

Как правило, проводить исследования, нацеленные на сооружения и остатки ВСиЗ, достаточно сложно. Но чтобы избежать внезапных препятствий, которые могут встретиться на пути проходки, необходимо прояснить всю ситуацию у владельца земель. Кроме этого нужно исследовать уровень загрязнения грунта и подземных вод, качество обратной засыпки, количество остатков. Например, при планировании постройки сооружения или подземных ком-

муникаций необходимо проверить масштаб, глубину и т. д., чтобы избежать взаимовлияния щитовой проходки и этих зданий, необходимо полностью проговорить конструкцию, способ производства работ и сроки.

### *3) Рекогносцировка и геоизыскания*

Цель рекогносцировки и геологических изысканий состоит в предоставлении необходимых базовых материалов для осуществления планирования, проектирования, производства работ и защитного управления. Геологические изыскания для щитовой проходки главным образом используются для выбора маршрута туннеля, подтверждения возможности использования щитовой проходки, предоставления доказательств для осуществления мероприятий по охране окружающей среды, вынесения решения по масштабу, характеру строительства, также они являются материалом по защитному управлению по окончании производства работ. Обычно в себя данный вид изысканий включает состав рельефа и геологических слоев, геологию, подземные воды, недостаток кислорода, содержание вредных веществ и др. Поскольку топографические и геологические условия являются решающим фактором, который определяет степень затруднения производства работ и проектирования щитовой проходки, то к данному процессу стоит отнестись крайне скрупулезно.

(1) Поскольку рельеф местности часто отражает подземные вмещающие породы, то первым шагом будет осмотр и овладение рельефом. Если на изучаемом месте холмы и возвышенности, то под землей обычно не будет аллювиальных отложений, поэтому редко встречаются слабые грунты. Кроме этого даже при наличии таких отложений можно, благодаря тщательным исследованиям топографических условий и условий окружающей среды, установить, в какой-то степени состав слоев подземных вмещающих пород. При некоторых геологических условиях, когда трасса туннеля в местах пересечений с плоскогорьем и равнинной местностью наклоняется или параллельна им, то может возникнуть очевидный уклон.

(2) Вместе с топографическими изысканиями накапливаются и исследуются документы, овладевая составом геологических слоев, которые находятся вдоль трассы. В районе, где производится щитовая проходка, обычно много полезных материалов. Наиболее представительными являются геологические карты, схемы пригодного грунта и т. д. Одновременно с этим с помощью бурения скважины стандартным пенетрационным испытанием проводятся основные изыскания, по результатам которых получается геологический разрез с пометкой всех слоев. Таким образом можно определить грунтовые проблемы во время производства работ щитовой проходкой и тем самым внимательно изучить эти самые проблемы.

(3) Обычно можно выполнять строительство проходческим щитом для любых оснований из вмещающих пород с применением проходческих щитов с закрытой лицевой стороной. Но при применении щита с нагнетанием глинистой воды, связный грунт будет приставать к режцовой головке и барокамере, что приводит к засорению и влияет на проходку; в рыхлом песчаном пласте будет возникать обвал забоя из-за трудности образования целостной глинистой пленки, что приведет к оседанию основания и провалу земли; а на гравийном пласте может возникнуть выкрашивание галек, что приведет к развалу забоя, износу, излому ножей или засорению грунторазгрузочной трубы. Поэтому надо производить расследование состава зерен, коэффициент фильтрации и т. д. (для гравийного пласта особенно расследовать форму, размер, содержание, твердость и неравномерность). И также при применении щита с грунтопригрузом, чтобы проектировать условие пластической текучести в барокамере, материал, форму режущей головки, форму прореза режцовой головки, винтового выбрасывателя и т. д., параметры требуют расследования формы, размера, твердости и состава зерна (в частности, содержания мелкозернистых), коэффициента фильтрации крупных галек.

В соответствии с условиями производства работ при применении сжатого воздуха на рыхлых песчаных слоях ниже уровня воды и снижении давления воздуха снизу рабочей поверхности могут одновременно выливаться вода и высыпаться песок; если повысить давление, то

песок в верхней части рабочей поверхности может пересохнуть, может быть потеряна глинистость, тем самым на мизерных аллювиях могут возникнуть зыбучие пески. Особенно когда слой вскрышной породы очень тонок, то совсем сложно достичь идеального эффекта по сжатию воздуху и может возникнуть утечка воздуха. При возникновении вышеупомянутых рисков, помимо измерения значения N-стандартного испытания на пенетрацию грунта, также нужно провести гранулометрический анализ, определить коэффициент пористости, на месте провести испытание водопроницаемости и определить минимальный коэффициент пористости и т. д. При производстве работ на слабых грунтах (пылеватый, глинистый), где значение N 1-2 и ниже, возникает риск снижения прочности из-за понижения уровня грунтовых вод, нужно проводить испытание на прочность. Говоря о достаточно слабых глинистых слоях, помимо вышеуказанных испытаний, лучше всего также определить содержание песка, влажность, коэффициент густоты, силу сцепления и т. д.

(4) При исследовании скважины необходимо определить местоположение подземных вод, но поскольку давление грунтовых вод, содержащихся в водянистых слоях, необязательно будет гидростатическим, нужно по отдельности определить поровое давление вод в каждом слое, где они содержатся. Рядом с районами, где есть горы и возвышенности или в слоях с гравием в пролювиальном веерообразном конусе, часто присутствуют артезианские напоры с избытком гидростатического давления. Наоборот, в городских и других районах часто по причине чрезмерной откачки воды давление в напоре воды будет ниже гидростатического, а иногда даже не бывает напора.

Такие уровни подземных вод и артезианские напоры воды могут меняться из-за человеческого фактора или вместе с сезонными изменениями, поэтому необходимо определить, при каких условиях происходит напор. Несмотря на то, что с помощью анализа гранулометрического состава можно примерно определить коэффициент фильтрации, лучше по месту провести испытание на водопроницаемость. Кроме этого, одновременно с исследованием подземных вод и артезианского напора, важным является исследование физических свойств подземных вод (содержание соли).

(5) Кроме того, часто возникают опасности, связанные с выбросом и взрывом биогаза, чтобы обеспечить безопасность строительной среды, необходимо выяснить, нет ли утечки вредного газа. Среди других видов вредных газов есть сероводород и газообразный оксид азота. Убедившись в наличии сероводорода, обратите внимание на проблему коррозии футеровки. Следовательно, когда ожидается наличие вышеупомянутых газов, надо исследовать состав вредных газов в порах. Если действительно есть газы с дефицитом кислорода или вредные газы, необходимо рассмотреть меры вентиляции и даже меры взрывозащиты.

В процессе строительства щита изыскания на этапе предварительного проектирования основаны на бурении с испытаниями на месте, инженерно-геологическими испытаниями и геофизическими исследованиями для приблизительного определения геологии пласта проходного участка щита и ориентировочного определения основных физико-механических свойств каждого слоя. На стадии строительного чертежа геологическое исследование должно дополнительно изучить литологию и физико-механические параметры поверхности выемки защитного туннеля и обеспечить основу для строительного чертежа и выбора щита. Требования к топографии и геологическим изысканиям для проекта защитного туннеля показаны в *таблице 3-1*.

*Таблица 3-1. Топографо-геологические изыскания щитового туннелестроения*

| Классификация изысканий | ТЭО                                                                                                                                                                                 | Первоначальные изыскания                                                                                                                                                                                                                                                                                       | Изыскания стадии Р                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
|-------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Цель изысканий          | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Овладение информацией о рельефе местности, характере грунта, геологических слоях</li> <li>2. Исследование качества почвы</li> </ol>       | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Ознакомление со строением геологических слоев и с геологическими условиями, которые находятся по всей трассе</li> <li>2. Овладение инженерно-геологическими свойствами</li> <li>3. Подготовка чертежей продольного и поперечного геологических разрезов</li> </ol>   | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Дополнительные геологические изыскания</li> <li>2. Подробное исследование, посвященное вопросам СМР и ПИР</li> <li>3. Сбор проектной документации о землетрясениях и других особенных условиях</li> </ol>                                                                                                                                                                                                                    |
| Способы изысканий       | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Собрать имеющиеся материалы</li> <li>2. Изучение литературы</li> <li>3. Проведение осмотра в соответствии с условиями по месту</li> </ol> | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Исследование скважины</li> <li>2. Стандартное испытание на пенетрацию</li> <li>3. Отбор проб</li> <li>4. Проверка уровня подземных вод</li> <li>5. Определение давления поровых вод</li> <li>6. Грунтовые испытания (физико-механические свойства грунта)</li> </ol> | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Исследование скважины</li> <li>2. Стандартное испытание на пенетрацию</li> <li>3. Отбор проб</li> <li>4. Определение давления поровых вод</li> <li>5. Испытание на водопроницаемость</li> <li>6. Грунтовые испытания</li> <li>7. Испытание нагрузкой</li> <li>8. Исследования недостатка кислорода, содержания ядовитых веществ, горючих паров</li> <li>9. Исследование разработки фундамента глубокого заложения</li> </ol> |

|                      |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
|----------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Содержание изысканий | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Исследование карт и других материалов (рельеф, геология, геологический разрез)</li> <li>2. Протоколы исследований грунта</li> <li>3. Строительные журналы имеющихся сооружений и конструкций</li> <li>4. Скважины, подземные воды</li> <li>5. Проведение изысканий на месте для наблюдения за местностью, геологией и окружающими условиями</li> <li>6. Просадка фундамента</li> </ol> | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Состав геологических слоев</li> <li>2. Значение</li> <li>3. Коэффициент фильтрации</li> <li>4. Уровень подземных вод, давление поровых вод</li> <li>5. Пробы</li> <li>6. Распределение фракций</li> <li>7. Влажность</li> <li>8. Удельная плотность грунта</li> <li>9. Плотность</li> <li>10. Предел прочности при неограниченном сжатии</li> <li>11. Предел текучести и раскатывания</li> <li>12. Степень схватывания</li> <li>13. Угол внутреннего трения</li> <li>14. Особенности прочности</li> <li>15. Коэффициент сжатия</li> <li>16. Модуль сжатия</li> </ol> | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Значение</li> <li>2. Коэффициент фильтрации</li> <li>3. Уровень подземных вод, давление поровых вод</li> <li>4. Пробы</li> <li>5. Распределение фракций</li> <li>6. Влажность</li> <li>7. Удельная плотность грунта</li> <li>8. Предел прочности при неограниченном сжатии</li> <li>9. Предел текучести и раскатывания</li> <li>10. Коэффициент сжатия</li> <li>11. Модуль сжатия</li> <li>12. Степень схватывания</li> <li>13. Угол внутреннего трения</li> <li>14. Особенности прочности</li> <li>15. Скорость потока подземных вод</li> <li>16. Размеры гравия и гальки</li> <li>17. Коэффициент сопротивления фундамента</li> <li>18. Скорости упругой волны</li> <li>19. Основные документы для сейсмостойкого проектирования</li> </ol> |
|----------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

При проведении геологических изысканий для щитовой проходки необходимо использовать комплексный подход, детально изучив геологическую ситуацию районов, через которые проложена трасса. Главным методом данного способа является бурение скважин. Количество шурфов должно быть определено степенью сложности геологических условий. Скважины должны располагаться по обеим сторонам трассы, их местоположение должно быть за границей трассы 2 – 5 м. Все скважины не должны располагаться внутри трассы туннеля, соединительных каналов и других долговечных конструкциях. По завершению испытаний необходимо ликвидировать скважины обратной засыпкой. Интервал скважин можно определить в соответствии с таблицей 3-2.

Таблица 3-2. Интервалы между скважинами (м)

| Вид                        | Интервал  | Вертикальный шурф |
|----------------------------|-----------|-------------------|
| Простая площадка           | 100 ~ 200 | 30 ~ 50           |
| Площадка средней сложности | 50 ~ 100  | 20 ~ 30           |
| Сложная площадка           | < 50      | < 20              |

Обыкновенная глубина бурения **H1**, определяется по формуле **H1=H+D+5 (m)**; подконтрольная глубина бурения **H2** определяется по формуле **H2=H+D+2D (m)**, где **H** – высота земляного покрова, **D** – внешний диаметр туннеля. Физические изыскания также являются важным методом изысканий. На месте с подходящим рельефом, геологическими условиями надо выявлять назначение разнообразных физических разведок, чтобы производить комплексную разведку. Из-за ограниченности физической разведки и многих вариантов результатов, в сочетании с бурением, разведкой канавами или выработками, дешифрированием и др. геологическими данными, необходимо производить определение физических механических показателей, разделение стратификаций породного грунта, обоснование зондирования подземных коммуникации, сооружений. Количество отверстий для выборочного испытания и испытание на месте не должно быть меньше чем 1/2 общих отверстий. Для участка контроля и влияния на проект маршрута щита надо производить аналитическое испытание по характеру, требованию конкретного объекта и со сбором образца породы, грунта и воды. Содержание испытания определяется на основании конкретного геологического условия и требуемых параметров породы, грунта и воды для проектирования.

### 3.1.2. Методы обследования туннелей

При инженерных изысканиях в туннелях, когда необходимо установить характер и распределение горных пород и грунта, образцы горных пород и грунта берутся из-под земли для проведения испытаний в помещении с целью определения физических и механических свойств горных пород и грунта. Методы разведки, такие как выемка грунта, бурение, и геофизические исследования.

#### 1) Копка

(1) Исследование котлована – грунтовый котлован, который вырывается вертикально вниз с помощью машин или рабочей силы или называется испытательным котлованом, а глубокий – разведочным колодцем. Участок разведки карьера можно разделить на круглые, овальные, квадратные, прямоугольные и т. д. По форме проема, а его площадь поперечного сечения составляет 1 м x 1 м, 5 м x 1 м. Выбор размера зависит от характера, назначения и глубины почвенного слоя. Глубина котлована обычно составляет от 2 до 3 м.

(2) Исследование траншеи – выкапывают длинный и узкий желоб, ширина которого обычно равна 0,6 ~ 1,0 м, длина зависит от потребности, глубина обычно меньше 2 м, рытье траншей подходит для мест, где коренная порода не является толстой, ее часто используют для отслеживания линии конструкции, для определения толщины и характера уклона слоя и остаточного слоя, и обнажения стратиграфической последовательности. Как правило, рытье траншеи следует устраивать перпендикулярно простиранию пласта или структурной линии.

#### *2) Простое бурение*

Простое бурение – метод, часто используемый в инженерно-геологических изысканиях, преимуществами которого являются легкий инструмент, небольшие размеры, удобство в эксплуатации, более быстрая съемка и низкая трудоемкость. Недостаток заключается в том, что с его помощью нельзя брать пробы почвы или пробы в ненарушенном состоянии, а также нелегко пробурить плотные или твердые породы. Обычно используемые простые буровые инструменты включают небольшие резьбовые сверла, сверла и лоянскую лопату.

##### *(1) Изыскания винтовым буром*

Конструкция бурового инструмента небольшого резьбового сверла включает в себя резьбовые буровые коронки и буровые штанги, которые просверливаются ручным роторным бурением под давлением, что подходит для связного грунта и супесчаных слоев грунта. Можно получить образцы нарушенного грунта и глубину бурения меньше 6 м.

##### *(2) Зонд для сверления*

Буровой зонд, также называемый конусным зондом, заключается в использовании бурового инструмента, который устремляется вниз в почву, чтобы определить толщину рыхлой покрывающей породы или глубину заглубленной коренной породы на ощупь. Глубина разведки обычно до 10 м. Его часто используют для определения мощности лессовых пещер, болот, слабых грунтов и уклона их подошв.

##### *(3) Лоянская лопата*

Лоянская лопата для разведки заключается в том, чтобы использовать силу тяжести лоянской лопаты, врезаться в почву и просверлить круглое отверстие малого диаметра и большой глубины, в которое могут быть взяты тревожные пробы почвы. Глубина проникновения обычно составляет 10 м, а в лессовом слое она может достигать около 30 м.

#### *3) Бурение*

В инженерно-геологоразведочных работах бурение – один из важнейших и широко используемых методов разведки, позволяющий получить достоверные геологические данные о глубоких пластах. Обычно он используется при копании, потому что простое бурение не может достичь этой цели. Чтобы обеспечить качество инженерно-геологических буровых работ и избежать пропуска или неправильного обнаружения важных геологических границ, во время процесса бурения не следует оставлять подозрительных мест, а также следует проводить точный анализ и оценку полученных геологических данных. Используйте геологические данные, полученные в результате наземных наблюдений, для руководства буровыми работами и проверки результатов бурения. По способу разрушения горных пород бурение можно разделить на: ударное бурение, вращательное бурение, ударно-вращательное бурение и вибрационное бурение.

#### *4) Геофизические исследования*

Любой метод, основанный на различии физических свойств различных геотехнологий и использующий специальные инструменты для наблюдения естественных или искусственных изменений в физическом поле для оценки подземных геологических условий, в совокупности называется геофизической разведкой.

Геофизические исследования можно разделить на электроразведку, электромагнитную разведку, сейсморазведку, акустическое обнаружение, гравиметрическую разведку, магнито-

разведку и радиоактивную разведку. В туннельной инженерной геологии чаще используются электроразведка, сейсморазведка и геологоразведка.

Электроразведка – это оценка подземной геологии путем измерения разницы в электропроводности породы и почвы. Между слоями грунта существует определенная разница в проводимости, а измеренный слой имеет определенную длину, ширину и толщину, а относительная глубина заглубления не слишком велика; когда местность относительно плоская и факторы помех, такие как плавающий ток и промышленные мощности переменного тока не велики, с помощью электрических исследований можно добиться лучших результатов.

Сейсмическая разведка – это метод геофизических исследований для обнаружения подземных геологических условий путем распространения искусственно возбужденных упругих волн, основанных на различии упругих свойств горных пород и грунта. Сейсмическая разведка напрямую использует внутренние свойства (плотность и упругость) горных пород, является более точной, чем другие геофизические методы, и может обнаруживать большие глубины. В инженерно-геологических изысканиях сейсморазведка в основном используется для определения толщины перекрывающих отложений, заглубленной глубины и толщины горной породы, местоположения и возникновения зоны разлома и т. д.; для изучения упругости породы и для определения коэффициента упругости породы.

Геологический радар (электромагнитный метод разведки) – это электромагнитное устройство, которое использует отражение высокочастотных электромагнитных импульсных волн для обнаружения пластовых структур и заглубленных объектов в грунте. Поэтому его также называют георадиолокацией. Он излучает широкополосные импульсные волны под землей через передающую антенну. При обнаружении различий в диэлектрической проницаемости и проводимости различных сред они будут отражаться на их поверхности раздела, а электромагнитные волны, возвращающиеся на поверхность, будут приниматься приемной антенной. Цель определяется на основе полученного эхо-сигнала, и рассчитываются ее расстояние и положение. Может использоваться для обнаружения с воздуха, земли и скважин, но в основном на земле.

### **3.2. КЛЮЧЕВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРИ ВЫБОРЕ ЩИТА**

Щитовой метод является одним из самых передовых методов строительства подземных туннелей. С тех пор, как Брюнель впервые использовал выкопанную вручную технологию прямоугольного щита для рытья первого щитового туннеля под Темзой в 1825 году, технология щита прошла много испытаний. Более чем 190 лет сделали метод проходки защитных туннелей подходящим для строительства в любых гидрогеологических условиях, будь то мягкие, твердые, с грунтовыми водами или без них, проходка защитных туннелей может использоваться при строительстве подземных тоннелей.

Изобретение Брюнеля первого в мире щита – проложило только 370-метровый туннель и просуществовало 18 лет. Во время строительства он испытал пять огромных потоков воды, и шесть жизней были принесены в жертву. В настоящее время технология строительства защитных туннелей непрерывно совершенствуется во многих странах мира, но при продвижении и применении было несколько несчастных случаев. Около 70% этих несчастных случаев вызваны ошибками при выборе и проектировании защитных ограждений, которые повлияли на период строительства всего проекта, но также привели к большим экономическим потерям и ненужным человеческим жертвам.

Щиты изготавливаются «на заказ» в соответствии с конкретными особенностями, такими как инженерная геология, гидрогеология, формы рельефа, наземные здания, а также подземные трубопроводы и сооружения.

#### **3.2.1. Принципы выбора щитовой проходки**

Выбор щитовой проходки является одним из ключевых факторов, обеспечивающим безопасную, экологичную, качественную, экономичную эксплуатацию щитовой проходки туннелей.

Среди принципов выбора можно выделить безопасность, технологичность, экономичность, которые связаны друг с другом. Главным принципом является безопасность, основной составляющей которого является гарантия стабильности забоя. При этом необходимо обращать внимание на геологические условия (классификация, прочность, коэффициент фильтрации, гранулометрический состав, фракции) и условия подземных вод, также необходимо полноценно указать условия строительной площадки, условия окружающей среды около вертикального шурфа, условия строительных подземных и надземных сооружений, располагающихся вдоль трассы, особенные условия площадки и др. На этой базе необходимо учитывать технологичность и экономичность, чтобы выбрать подходящий туннелепроходческий комплекс. При ошибочном решении необходимо будет использовать много вспомогательных решений, и возможно приведет это к невозможности туннельной проходки или даже возникновению серьезных неполадок во время производства работ. При выборе щита необходимо следовать следующим правилам:

(1) Необходимо адаптироваться под инженерно-геологические и гидрометеорологические условия, прежде всего, нужно отвечать требованиям безопасности на объекте.

(2) Необходимо объединить безопасность, передовые технологии и экономичность, в условиях надежного обеспечения безопасности необходимо всецело учитывать технологичность и экономичность.

(3) Необходимо удовлетворить требованиям внешнего диаметра туннеля, его длины, глубины залегания, строительной площадке, окружающей среды и т. д.

(4) Необходимо отвечать требованиям безопасности, качества, сроков производства работ, экологичности и формирования стоимости выполнения работ.

(5) Мощности вспомогательного оборудования должны подходить главному оборудованию щита, производственные мощности должны совпадать со скоростью проходки, одновременно с этим необходимо обладать такими особенностями, как: безопасность производства работ, несложная конструкция, рациональное расположение оборудования, легкость в ТО.

(6) Известность, уровень доверия, обеспечение техсервиса завода-производителя щита.

В соответствии с вышеуказанными принципами необходимо провести анализ основных технических параметров и типа туннелепроходческого комплекса, чтобы гарантировать безопасность и надежность щитовой проходки, тем самым определить наиболее подходящий щит и наилучшие методы производства работ. Выбор щита является ключевым звеном при производстве работ, это напрямую влияет на безопасность, качество, технологию и себестоимость производства работ щитовой проходкой. Необходимо крайне внимательно отнестись к выбору щита, чтобы обеспечить оптимальный ход производства работ и их завершение.

### **3.2.2. Шаги при выборе проходческого комплекса**

(1) Основываясь на изучении инженерно-геологических, гидрометеорологических условий, окружающей среды, требований сроков производства работ, экономичности и т. д., выбрать тип проходческого щита. В соответствии с устойчивостью вмещающих пород, необходимо выбрать щит открытого или закрытого типа. В соответствии с геологическими условиями необходимо выбрать щит для слабых пород или комплексного типа.

(2) При выборе щита закрытого типа необходимо в соответствии с коэффициентом фильтрации, давлением подземных вод, вспомогательных методов по производству работ, окружающей средой, безопасностью и другими факторами выбрать щит с гидропригрузом или грунтопригрузом.

(3) Если щит с гидропригрузом и грунтопригрузом не может удовлетворить требованиям забоя, то нужно подумать о выборе щита комплексного типа.

(4) В соответствии с материалами геологических изысканий необходимо произвести расчет и выбор главных функциональных агрегатов щита, спроектировать (например, вид привода и тип конструкции резцовой головки, количество забоя, виды режущих устройств и их расположение, вид и габариты шнекового транспортера, конструкцию призабойной стены и вид шламовой двери, расположение и вид дробильной установки и т. д.) и утвердить в соответствии с геологическими условиями главные технические параметры, при выборе которых необходимо провести точный расчет (диаметр резцовой головки, скорость оборотов, крутящий момент, мощность привода, скорость проходки и толкания, мощность, диаметр, длина шнека и т. д.).

(5) В соответствии с геологическими условиями выбрать оборудование для «хвоста» комплекса, которое будет совпадать по параметрам со скоростью проходки.

### **3.2.3. Теория и практика выбора щитовых комплексов**

Способы выбора проходческого щита главным образом придерживаются теории треугольника.

Общие принципы теории треугольника – это «центром является устойчивость забоя, основной частью являются инженерно-геологические и гидрометеорологические условия; доказательной базой являются фракции, коэффициент фильтрации, давление подземных вод, также необходимо комплексно продумать актуальную ситуацию производства работ; гарантировать, что выбранный комплекс будет отвечать общей цели по устойчивости, проходке и выбросу». Вкратце это можно сказать следующим образом: «один центр, две основы, три доказательства и три действительности, три большие цели» (рис. 3-1).

#### *1) Стабильность забоя.*

При туннельном строительстве щитопроходным способом необходимо решить три основных вопроса: режущая поверхность (экскавация), давление уравнивающей поверхности (стабилизация), вывод шлакового грунта из призабойного отсека (вывод).

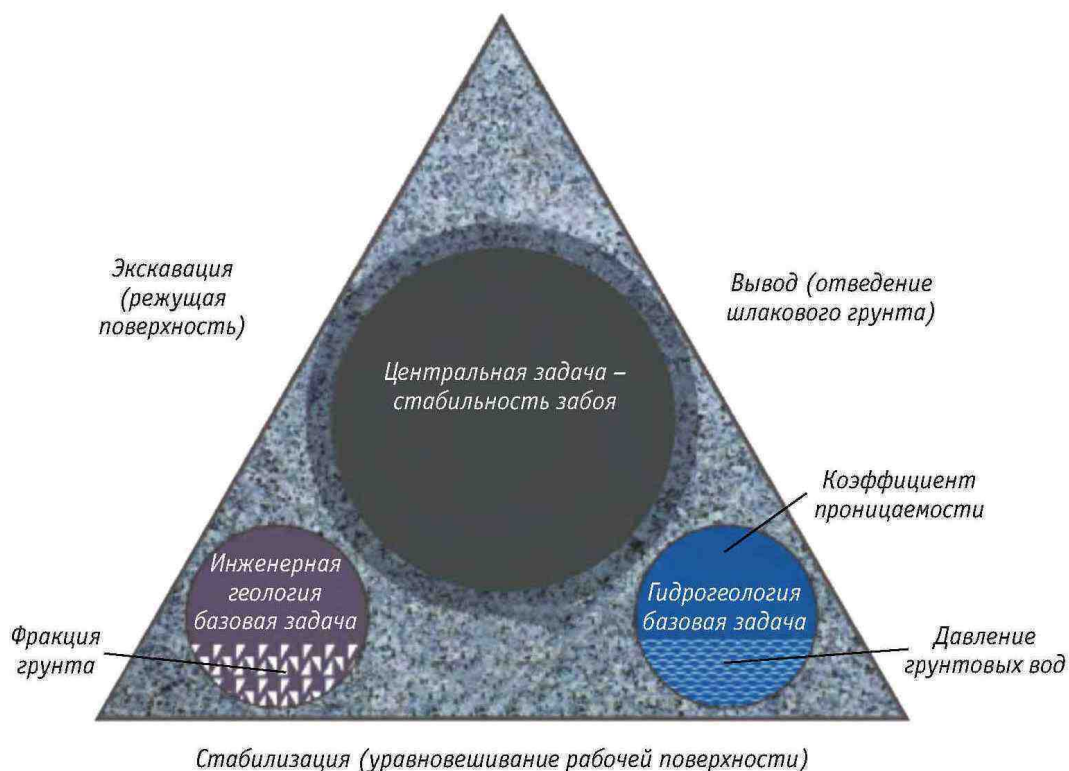


Рис. 3-1. Схема треугольной теории выбора проходческого щита

Касательно режущей поверхности (экскавации) при одинаковых условиях пласта и резцовой головки, все виды щитов примерно одинаковы, отличается лишь давление уравнивающей поверхности (стабилизация) и способ выведения шлакового грунта (вывод).

Конструкция стабилизации забоя в щитопроходческом комплексе подразделяется на два вида: открытого типа и закрытого типа. В обоих видах вопрос стабилизации забоя решается по-разному. Открытый тип подразумевает опору на твердость грунтовой поверхности забоя, а в закрытом типе – при помощи давления грунтовой массы (щит с грунтопригрузом), либо давления глинистой воды (щит с гидропригрузом) оказывается сопротивление стремящейся к высвобождению нагрузке поверхности забоя, тем самым сохраняется его стабильность.

(1) *Стабильность забоя при использовании щита открытого типа.*

При использовании щита открытого типа, стабильность поверхности забоя во время прохождения вперед осуществляется посредством установленной в щите грунтоудерживающего механизма и улучшения состояния грунтовой массы.

#### 1. Грунтоудерживающий механизм

Грунтоудерживающий механизм щита открытого типа состоит из подвижной стрехи, передвижной грунтоудерживающей плиты и толкающих гидроцилиндров. Сначала установленная в передней части щита грунтоудерживающая стреха врезается в грунт, одновременно предотвращая обрушение забоя и осуществляя проходку вперед, затем передвижная грунтоудерживающая плита, расположенная в экскавируемой зоне, с помощью гидроцилиндров осуществляет опорное сдерживание с одновременной проходкой вперед.

#### 2. Улучшение грунта забоя

Существует несколько способов улучшения грунта забоя: пневматический (нагнетание воздуха), способ осаднения воды, способ химического цементирования и др. В зависимости от условий конкретного проекта, могут применяться несколько комбинированных способов.

а. Пневматический способ использует гидростатичность и эффект нагнетания воздуха в грунтовом основании в качестве объекта, с помощью грунтоудерживающего эффекта отвода воды сжатым воздухом предотвращается затопление и обвал забоя. В данном способе применяется сравнительно простое оборудование, позволяющее с легкостью осуществлять управление параметрами давления, благодаря чему он чаще всего используется в щитах открытого типа. Однако, поскольку работы выполняются в условиях высокого давления, возникают проблемы, связанные с окружающей средой работ, эффективностью работ и т. д., к тому же, вследствие различия грунтовых слоев, приходится прибегать к мерам, противодействующим утечке воздуха, извержению наружу и переполнению бескислородного воздуха, поэтому данный способ на сегодняшний день применяется нечасто.

б. Способ понижения уровня подземных вод применяется по вектору расположения туннеля, с помощью метода создания скважинно-точек и метода создания глубоких скважин на поверхности грунта, удаляются подземные воды в зоне забоя с целью укрепления основание грунта. Метод скважинно-точек и другие способы для понижения уровня подземных вод применяются также и внутри туннеля.

с. Метод химического цементирования – это еще один способ обеспечения стабильности забоя путем принудительной закачки химической бетонирующей суспензии, который применяется в зоне грунтового зазора с целью повышения водонепроницаемости и прочности. Данный метод обладает хорошей технологичностью, достаточно часто используется для улучшения зон в ограниченных областях. Применяется два вида работ по закачке суспензии: первый вид применяется перед осуществлением проходки щита, второй вид применяется по мере осуществления проходки путем закачки суспензии внутри туннеля.

*(2) Принцип уравнивания давления забоя при проходке щитом закрытого типа.*

При проходке щитом закрытого типа уравнивание давления забоя чаще всего происходит с помощью гидропригруза и грунтопригруза. Прежде всего, стоит понять, что такое грунтопригруз и что такое гидропригруз.

На *рис. 3-2* показан принцип уравнивания с помощью грунтопригруза, из которого видно, как посредством регулировки скорости проходки и скорости вращения шлакоотводящего шнека регулируется объем скапливающегося в призабойном отсеке грунта, тем самым производится уравнивание давления грунта и жидкости в забое. В целях достижения наилучшего уравнивания забоя, шлаковый грунт в призабойном отсеке должен обладать достаточной вязкостью и текучестью. Однако, вследствие того, что медиаторной средой регулировки давления выступает шлаковый грунт в призабойном отсеке, то имеется определенная задержка, поэтому степень точности регулировки давления обычно достигает лишь 0.1 МПа.

На *рис. 3-3* показан принцип уравнивания с помощью гидропригруза, из которого видно, как посредством сжатого воздуха в кессонном отсеке щита уравнивается давление грунта и вод забоя. В целях достижения наилучшего уравнивания забоя шлаковый грунт в призабойном отсеке должен обладать достаточной вязкостью и текучестью. Так как воздушное давление можно регулировать с достаточной скоростью и точностью, то в процессе стабилизации забоя щит с гидропригрузом имеет естественное преимущество перед щитом с грунтопригрузом.

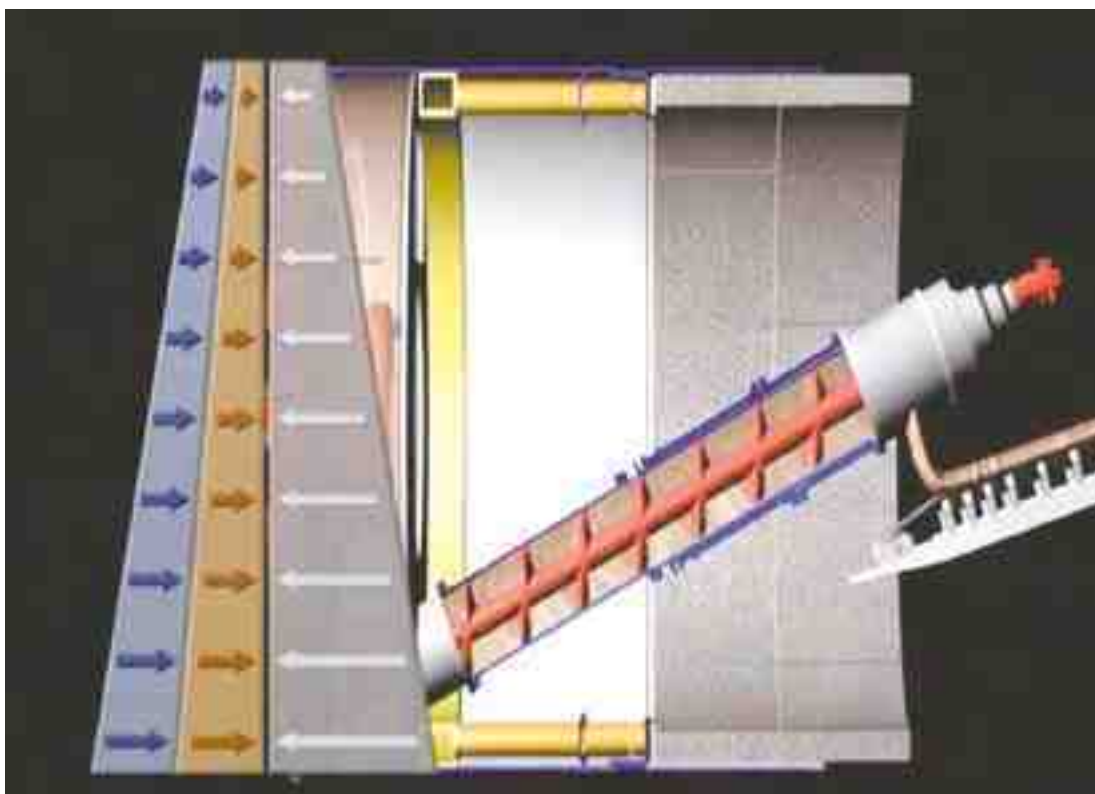


Рис. 3-2. Принцип грунтопригруза

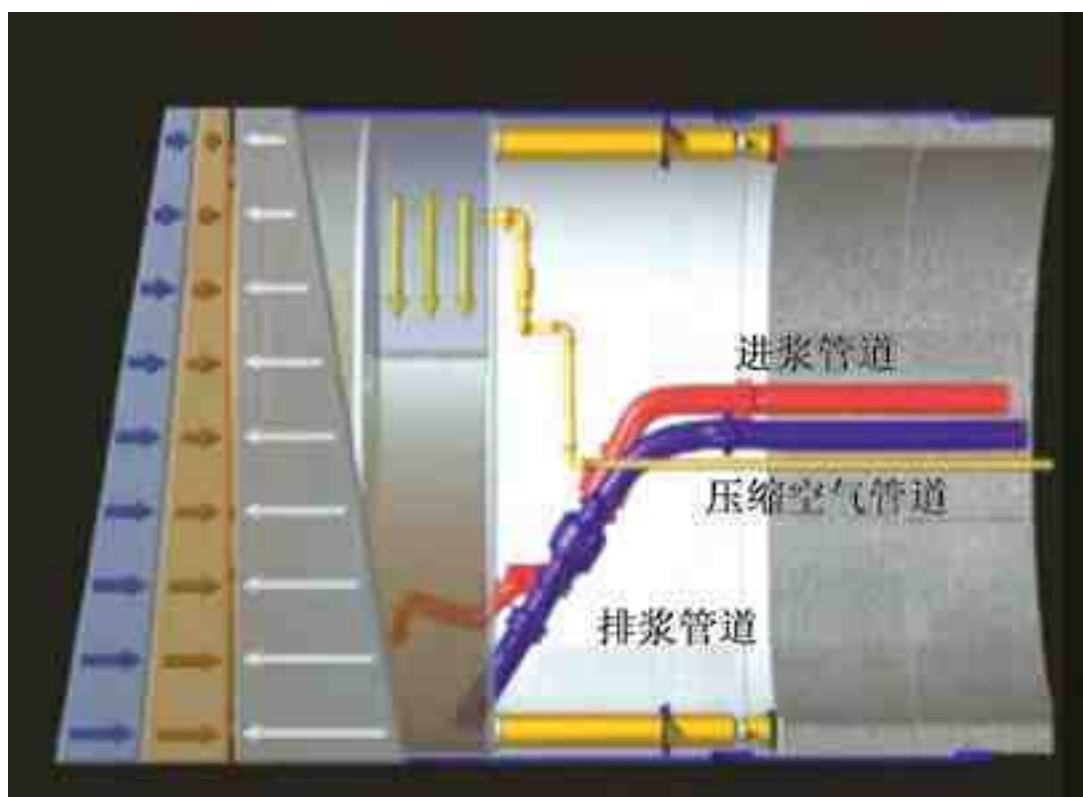


Рис.3-3. Принцип гидropriгруза

*(3) Стабилизация забоя при использовании щита с грунтопригрузом.*

Механизм стабилизации забоя при использовании щита с грунтопригрузом имеет следующие особенности:

1. В вынутый шлаковый грунт добавляются определенные добавки, посредством принудительного перемешивания резцовой головкой и лопастями миксера достигается улучшение его пластичности, текучести и водоотталкивающих свойств.

2. Когда шлаковый грунт заполняет призабойный отсек и полости шнека, с помощью толкающего усилия гидроцилиндров продвижения щита производится давление на шлаковый грунт, тем самым создается уравнивание давления грунта и грунтовых вод забоя.

Поэтому в целях обеспечения стабилизации давления грунта в забое можно, при условии обеспечения стабильного состояния забоя, успешно осуществить вывод шлакового грунта. В то же время необходимо произвести улучшение шлакового грунта, обеспечив пластичность, текучесть и водоотталкивающие свойства.

Когда в вынимаемом шлаковом грунте мелкодисперсные частицы составляют около 30% объема, то перемешивание при хорошем гранулометрическом составе обеспечивает его пластичность и текучесть. Однако когда содержание песка и гравия относительно высокое, а гранулометрический состав не очень хороший, необходимо в шлаковый грунт добавить бентонит либо глинистые добавки и перемешать, регулируя тем самым гранулометрический состав. Для улучшения характеристик шлака при экскавации иногда добавляют пенные либо полимерные материалы. В ситуациях, когда гранулометрический состав плохой, добавления пенных или полимерных материалов бывает недостаточно; в таких случаях для достижения наилучшего эффекта добавляют также бентонит, глину и другие глиноформовочные материалы.

1. Стабилизация забоя в условиях вязких грунтовых слоев.

В вязких слоях грунта, таких как алевроитовый песок, песчаный ил и др., шлак, срезанный режущим инструментом, как правило, имеет меньшую прочность, чем исходный слой, и обладает пластичностью и текучестью. Даже у почвы с большой адгезией, благодаря перемешиванию с помощью резцовой головки и шнекового транспортера, а также добавлению воды в грунтовый отсек и т. д., можно повысить текучесть. Что касается водонепроницаемости, то, поскольку коэффициент водопроницаемости вязкого грунта невысокий, водоотталкивающие свойства хорошие.

Шлак в бункере должен иметь определенное давление, чтобы конкурировать с давлением воды и грунта забоя. В соответствии со скоростью проходки, посредством регулировки крутящего момента и скорости вращения шнека, а также степени открытия заслонки шлакового грунта, достигается баланс между количеством грунта в забое и количеством отводимого грунта, обеспечивая стабилизацию забоя. Как правило, для контроля давления в забое используются датчики давления грунта, расположенные на внутренних стенках призабойного отсека. Однако стоит обратить внимание, что иногда вследствие плохой текучести, невозможно точно измерить давление грунта в призабойном отсеке.

Кроме того, если количество грунта в призабойном отсеке будет чрезмерным, вязкий грунт может начать уплотняться и застывать, что приведет к невозможности его экскавации и отвода, в таких случаях в грунт следует ввести добавки.

2. Стабилизация забоя в условиях песчаных грунтовых слоев.

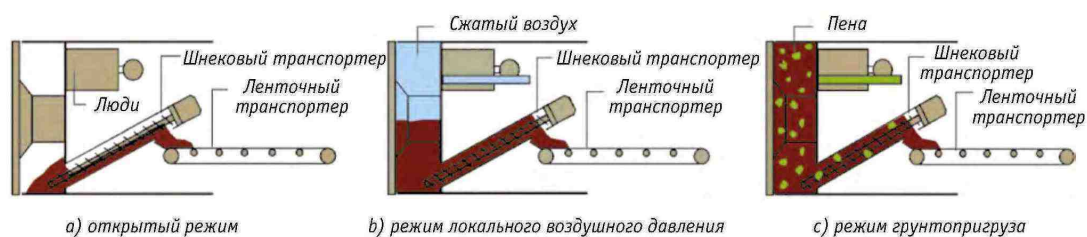
Вследствие того, что сопротивление, угол внутреннего трения и сила трения песчаных и гравийных грунтовых слоев высоки, сложно добиться хорошей текучести. Когда вынутый грунт заполняет призабойный отсек и полости шнека, крутящий момент резцовой головки и шнека, а также толкающее усилие гидроцилиндров щита увеличиваются, при этом проведение экскавации и отвод грунта не представляется возможным. Кроме того, коэффициент проницаемости в грунтовых слоях такого типа высокий, а эффект сжатия в призабойном отсеке и шнековом конвейере не может полностью остановить воду: при высоком давлении

воды в забое, высока вероятность извержения материала через заслонку. Поэтому в слоях данного типа обычно используются такие методы, как введение добавок в забое или призабойном отсеке, установка дополнительных лопастей для принудительного перемешивания и другие способы придания шлаковому грунту текучести и водоотталкивающих свойств.

Как и в случае вязких грунтовых слоев, при помощи регулирования объема экскавации и количества отводимого грунта, можно добиться баланса между давлением воды и давлением грунта забоя, что способствует стабилизации забоя.

### 3. Три режима работы щита с грунтопригрузом.

Щит с грунтопригрузом обычно имеет три режима работы: открытый режим, режим локального давления воздуха и режим грунтопригруза (ЕРВ). Как показано на *рис. 3-4*, Каждый из этих режимов проходки соответствует разным механизмам стабилизации забоя и геологическим условиям.



*Рис.3-4. Три режима проходки щита с грунтопригрузом*

#### *а. Открытый тип.*

Если забой достаточно стабилен, а грунтовых вод мало, щит с грунтопригрузом может использовать открытый режим работы, нет необходимости регулировать давление в призабойном отсеке, также можно гарантировать отсутствие деформации забоя и разрушения грунта в течение определенного отрезка времени. В этом режиме работы, срезаемый грунт сразу же отводится из призабойного отсека шнековым конвейером, поэтому призабойный отсек, в основном, находится в пустом состоянии, а режущая головка и шнековый конвейер подвергаются относительно небольшому обратному воздействию крутящего момента. В таком случае, в основном при дроблении горных пород роликовыми резцами, проходка происходит с высокой скоростью, низким крутящим моментом и подходящей скоростью шнекового конвейера. Во время синхронного цементирования, бетонизирующая суспензия может просачиваться в зазор между оболочкой щита и окружающим грунтовым массивом, и даже попадать в зону режущей головки; избежать появления подобных ситуаций можно следующими способами: повышением вязкости бетонизирующей суспензии до соответствующих значений, сокращением времени застывания суспензии, регулировкой давления бетонизирующей суспензии, дополнительным цементованием несущей поверхности тубингов и другими способами.

#### *б. Полуоткрытый тип («режим локального воздушного давления»).*

Скоростная проходка полуоткрытым способом применяется в случаях, когда забой обладает высокой степенью самостабильности, например, когда прилегающие грунтовые слои стабильны, но содержат грунтовые воды, либо когда большая часть прилегающего грунта стабильна, за исключением локальной потери давления и обрушения. При использовании данного режима временно останавливается шнек, закрывается шнековая заслонка, нижняя часть призабойного отсека заполняется шлаковым грунтом; в то же время в забой и призабойный отсек вводится необходимое количество присадочных материалов (таких как бентонит, глинистые материалы, присадки) и сжатый воздух, чтобы повысить водоотталкивающие свойства шлака

в призабойном отсеке, а также под давлением в забой добавляются присадочные материалы для создания на поверхности забоя глинистой пленки. Посредством воздушного давления и глинистой пленки предотвращается затопление и обрушение туннеля, а также на малой скорости вращения в полости шнека образуется «грунтовая пробка», что позволяет безопасно и быстро пройти неблагоприятные участки грунта. Во время экскавации в призабойном отсеке остается определенное количество свободного места (шлаковый грунт заполняет призабойный отсек примерно на 2/3), что позволяет ввести в отсек сжатый воздух, который совместно со шлаковым грунтом будет выполнять функцию поддержки забоя и предотвращать проникновение подземных вод.

Помимо этого, данный тип также часто используется при работе в условиях мягких верхних и твердых нижних слоев. Во время работы, дробление твердых пород производится роликотыми резцами, а разрезание грунтовых слоев осуществляется с помощью зубчатых и скребковых резцов. При проходке в области дна реки, необходимо добавить пенообразователь, полимеры, бентонит и др., для улучшения водоотталкивающих свойств шлака и создания стабильного уравнивающего давления в призабойном отсеке.

*с. Режим грунтопригруза.*

При экскавации в условиях плохой стабилизации грунта, либо мягких горных пород с высоким содержанием грунтовых вод, применяют режим грунтопригруза (ЕРВ). В этом режиме, с помощью зубчатых и ножеобразных резцов происходит разрезание грунта и продвижение на низкой скорости с большим крутящим моментом, а также заполнение призабойного отсека шлаком, выходящего из резцовой головки. Шлак в призабойном отсеке принудительно перемешивается специальными лопастями, приваренными к обратной стороне резцовой головки и к различным зонам разделительной перегородки, при этом с помощью толкающего усилия гидроцилиндров, воздействующих на разделительную перегородку, создавая дополнительное давление глинистого грунта. Данное давление может измеряться датчиками давления грунта и контролироваться путем регулировки толкающего усилия, скорости продвижения и скорости шнека, обеспечивая равенство количества экскавируемого грунта и отводящегося шлака, а также уравновешенное состояние между давлением шлака в призабойном отсеке и давлением грунта и воды в забое.

4. Факторы, влияющие на стабилизацию забоя.

*а. Давление грунта в призабойном отсеке, грунтового слоя и воды.*

Щит должен поддерживать необходимое давление грунта в призабойном отсеке и непрерывно регулировать количество отводящегося грунта для того, чтобы сбалансировать давление грунта и давление воды в забое. Этот процесс можно разделить на следующие виды состояний: когда давление грунта в призабойном отсеке превышает давление грунта и давление воды в забое, поверхность земли поднимается; когда давление грунта в призабойном отсеке меньше давления грунта и давления воды в забое, поверхность земли оседает; когда давление грунта в призабойном отсеке совпадает с давлением грунта и давлением воды в забое, поверхность земли остается в покое.

*б. Количество отводимого шнеком грунта.*

Количество отводимого грунта обычно регулируется путем изменения скорости вращения шнека и степени открытия грунтовыводящей заслонки.

*с. Текучесть глинистого грунта.*

Для обеспечения стабильности забоя, срезанный грунт должен обладать текучестью и водоотталкивающими свойствами, а также в достаточной степени заполнять призабойный отсек.

5. Добавки для улучшения шлакового грунта.

Существуют следующие виды добавок, улучшающих шлаковый грунт при использовании щита с грунтопригрузом:

*а. Глинистые материалы.*

Для того чтобы шлаковый грунт обладал хорошей текучестью и водоотталкивающими свойствами, в его составе должно содержаться около 30% мелкодисперсных частиц. Если в вынутом грунте содержится недостаточное количество мелкодисперсных частиц, необходимо ввести бентонит, глину, прочие глиноформирующие материалы, для восполнения нехватки мелкодисперсных частиц. Концентрацию и необходимый объем введения глинистых материалов определяют исходя из гранулометрического состава, коэффициента неравномерности шлака и др.

*б. Вспенивающий агент.*

Для повышения текучести и водоотталкивающих свойств шлака, в забой или призабойный отсек добавляют специальную пену на основе особого вспенивающего агента. В песчаных и гравийных грунтовых слоях текучесть шлака повышается за счет вспомогательной роли пузырьков пены; в вязких грунтовых слоях, пузырьки пены играют роль активной среды, препятствующей налипанию шлака на стенки призабойного отсека. С другой стороны, поскольку мелкие пузырьки пены вытесняют поровую воду во фракциях грунта, повышаются водоотталкивающие свойства. Количество вводимой пены, как и в случае с глинистыми материалами, определяется гранулометрическим составом, коэффициентом неравномерности шлака и др.

*с. Вода.*

Введение воды в шлаковый грунт большой вязкости может помочь увеличить текучесть и, вместе с тем, понизить его вязкость, предотвращая налипание шлака на резцовую головку и стенки призабойного отсека.

*(4) Стабилизация забоя при использовании щита с гидropriгрузом.*

Существуют следующие особенности стабилизации забоя при использовании щита с гидropriгрузом:

1. На поверхности забоя образуется труднопроницаемая глинистая пленка, которая позволяет давлению глинистой воды более эффективно воздействовать на поверхность забоя.
2. По мере проникновения глинистой воды в почву, ее мелкодисперсные частицы заполняют пустоты почвы, увеличивая прочность грунта.
3. При помощи регулировки скорости вращения подающего насоса, создается необходимое давление глинистой воды в призабойном отсеке, что позволяет контролировать давление грунта и воды в забое.

Значит, для обеспечения стабильности забоя необходимо установить оптимальный напор глинистой воды, и в то же время для достижения наибольшего эффекта этого напора нужно обращать внимание на ее качество. Среди важных качественных характеристик глинистой воды выделяют: плотность, коэффициент проницаемости, вязкость, особенности фильтрации, содержание песка и др.

*1. Плотность глинистой воды.*

Теоретически, увеличение плотности глинистой воды может увеличить ее ДНС (динамическое напряжение сдвига) и в то же время может усилить стабильность глинистой пленки. Как показывает практика, высокая плотность глинистой воды помогает создавать высококачественную глинистую пленку; лучше всего, когда плотность глинистой воды достигает плотности грунта забоя. Однако ее высокая плотность может привести к перегрузке шламового насоса и затруднительной переработке; а низкая плотность глинистой воды, несмотря на то, что помогает снизить нагрузку шламового насоса, из-за увеличения просачивания способствует замедлению образования глинистой пленки, что негативно сказывается на стабильности забоя. Следовательно, при определении плотности глинистой воды необходимо в полной мере учитывать структуру почвы, а также учитывать мощность оборудования при стабилизации забоя. Обычно плотность глинистой воды составляет 1.05 ~ 1.30 гр/см<sup>3</sup>.

*2. Содержание песка и коэффициент проницаемости.*

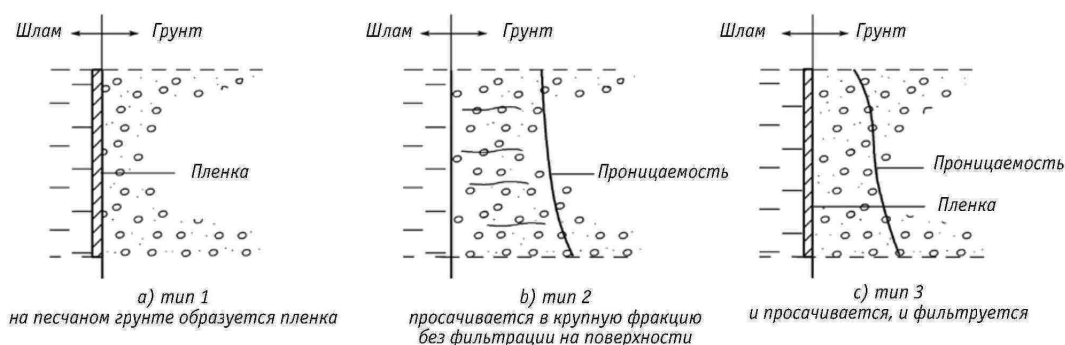
Как показано на *рис. 3-5*, Мюллер (Muller) и др., разделяют проницаемость глинистой воды на следующие три типа:

*Тип 1-й*: шламовая жидкость практически не просачивается, лишь формирует на поверхности глинистую пленку.

*Тип 2-й*: при больших порах в почве шламовая жидкость полностью проникает внутрь, не формируя на поверхности глинистую пленку.

*Тип 3-й*: является средним между типом 1-м и типом 2-м: шламовая жидкость частично проникает в почву, формируя при этом на поверхности глинистую пленку.

Тип 1-й в основном встречается в вязком грунте с малым коэффициентом проницаемости; тип 2-й – в песчано-гравийном грунте с большим коэффициентом проницаемости; тип 3-й – в песчаном грунте.



*Рис. 3-5. Фильтрационное состояние глинистой воды в грунте забоя*

В почвах с высокой водопроницаемостью из-за способности мелкодисперсных частиц заполнять поры грунта, скорость образования глинистой пленки тесно связана с максимальным размером частиц песка и количеством песка (вес песчинки / вес частиц глины). Как правило, имеет место следующая закономерность:

а. При коэффициенте проницаемости грунта равном  $k=5 \times 10^{-3}$  м/с, если максимальный размер песчаной фракции достигает 0.84 мм, происходит проникновение в почву; только при максимальном размере песчаной фракции равном 2.0 мм за примерно 10 с, просачиваемость стабилизируется и происходит формирование глинистой пленки.

б. При увеличении содержания песчаных фракций  $S/c$  формирование глинистой пленки происходит все лучше и лучше. При  $k=5 \times 10^{-3}$  м/с и  $ds > 0.42$  мм, для формирования глинистой пленки и уменьшения количества проникновения воды, достаточно значения  $S/c$  больше 0.1.

### 3. Вязкость глинистой воды.

Шламовая жидкость оптимальной вязкости имеет следующие эффекты воздействия:

а. Не допускает оседания песчаных и глинистых фракций на дне шламового призабойного отсека и обеспечивает стабилизацию забоя.

б. При повышении степени вязкости увеличивается сила сопротивления и предотвращаются потери глинистой воды.

с. Позволяет транспортировать экскавируемый грунт в текучем виде, а шламовую жидкость разделять при помощи специального оборудования на глину и воду.

Во время работы на площадке значение вязкости Ваннера определяется количеством времени, затраченным на полное вытекание глинистой воды из воронкообразного контейнера для оценки его вязкости, получая подобие эквивалента вязкости. Значения вязкости Ваннера, часто используемые для стабилизации забоя, приведены в *таблице 3-3*.

Таблица 3-3. Величина вязкости Ваннера, требуемая для стабилизации забоя

| Вид экскавируемого грунта  | Величина вязкости Ваннера (s) 500/700 мл |                               |
|----------------------------|------------------------------------------|-------------------------------|
|                            | малое влияние грунтовых вод              | большое влияние грунтовых вод |
| песчанисто-пылеватый грунт | 25 ~ 30                                  | 28 ~ 34                       |
| запесоченная глина         | 25 ~ 30                                  | 28 ~ 37                       |
| запесоченная глина         | 27 ~ 34                                  | 30 ~ 40                       |
| песок                      | 30 ~ 338                                 | 33 ~ 40                       |
| песчаный раствор           | 35 ~ 44                                  | 50 ~ 60                       |

#### 4. Давление глинистой воды.

Несмотря на то, что при повышении давления глинистой воды увеличивается объем просачиваемости, его увеличение значительно меньше по сравнению с увеличением давления, таким образом щит с гидропригрузом посредством нагнетания давления глинистой воды повышает эффективность опорного давления, действующего на забой. Особенно при использовании высококачественной глинистой воды повышение ее давления может увеличить стабильность забоя. При определении давления глинистой воды нужно учитывать следующие факторы: давление воды забоя, давление грунта, а также резервное давление.

#### 5. Скорость проходки.

В обычном режиме работы проходки щита с гидропригрузом режущий инструмент разрезает грунт не напрямую, а разрезает глинистую пленку, образовавшуюся на передней части резцовой головки. Сразу после разрезания образуется новый слой глинистой пленки. Поскольку скорость вращения резцовой головки щита является определенной величиной, а максимальная скорость продвижения щита ограничена, скорость проходки зависит только от глубины грунта и не имеет отношения к глинистой пленке. Однако, когда щит с гидропригрузом находится в ненормальных условиях работы, особенно когда качество глинистой воды и ее давление не соответствуют требованиям проекта, для образования глинистой пленки требуется много времени, что ограничивает скорость проходки. Время, требуемое для формирования глинистой пленки при использовании высококачественной глинистой воды, составляет 1 – 2 секунды.

#### 2) Выбор модели щита

Основой для выбора щита являются инженерно-геологические и гидрогеологические условия, размер отдельных минеральных частиц (зерен) грунта, коэффициент проницаемости и давление грунтовых вод, а процесс выбора сочетается с практическими аспектами конкретного проекта (т. е. концепция «Три принципа и три практических аспекта») для обеспечения того, чтобы выбранный щит отвечал общим целям «стабильности (балансировки забоя), экскавации (фрезерование забоя грунта) и выгрузки (выгрузки грунта)».

#### (1) Выбор на основе размера частиц пласта

Взаимосвязь между типом щита и размером частиц пласта для проходческого щита с балансом давления грунта без улучшения остатков почвы и щитов с балансом глинистой воды без дополнительных компонентов показана на *рис. 3-6*.

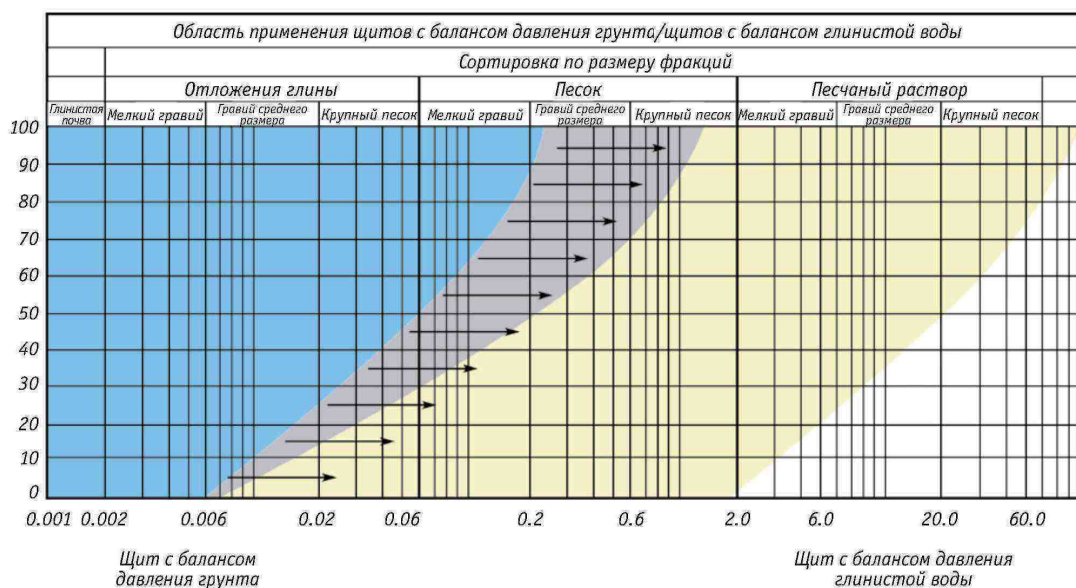


Рис. 3-6. Кривая зависимости размера частиц в пласте от типа щита

Как видно из рис. 3-6, проходческий щит с балансом давления грунта без улучшения остатков почвы наиболее подходит для диапазона размеров частиц менее 0.2 мм (синяя область) и приблизительно до 1.5 мм (серая область). Диапазон размеров частиц для щитов с балансом глинистой воды начинается от 0.01 мм до 80 мм (желтая область).

Щит с балансом давления грунта в основном подходит для строительства в глинистых слоях почвы, таких как мел, меловая глина, кремнистый мел, меловой песок и т. д. При рытье в глинистых слоях почвы, грунт, срезанный фрезой, попадает в отсек для грунта и затем выводится шнековой машиной, в шнековой машине образуется градиент давления для поддержания стабильного давления в отсеке для грунта.

В сущности, мелкозернистые остатки грунта легко образуют водонепроницаемые пластомеры, которые могут легко заполнить каждую часть грунтового отсека и сформировать эффект почвенной пробки в спиральной машине, которая может создать давление в грунтовом отсеке, чтобы сбалансировать давление почвы и воды на поверхности забоя.

Вообще говоря, когда общее количество порошковых и глинистых частиц в почве достигает более 40%, обычно целесообразно использовать щит с балансом давления грунта; в противном случае более подходящим является щит с балансом глинистой воды; абсолютный размер частиц порошка обычно определяется как 0.075 мм.

В частности, следует отметить, что при выборе щита на основе размера зерна пласта необходимо учитывать конкретные условия проекта. Хотя размер зерна пласта отличается для щитов с балансом давления грунта и щитов с балансом глинистой воды, как показано на рис. 3-7, щит баланса давления грунта подходит для глинистых, иловых, песчаных пластов с размером зерна 1.5 мм или менее без улучшения остатков грунта. Подходящий диапазон размера частиц пласта составляет от 0.01 до 0.80 мм.

При отсутствии добавок подходящий диапазон размеров грунта для щитов с балансом глинистой воды составляет от 0.01 до 0.80 мм для ила, песка, гравия, гальки и других пластов. Однако, если щит с балансом давления грунта модифицирован или в щите с балансом глинистой воды используются соответствующие добавки, то данные щиты подходят для одного и того же диапазона.

(2) Выбор на основе коэффициента проницаемости

Как показано на *рис. 3-8*, согласно европейскому и американскому опыту, когда коэффициент проницаемости пласта меньше **10-7 м/с**, следует использовать щит с балансом давления грунта. Когда коэффициент проницаемости пласта больше **10-4 м/с**, следует использовать щиты с балансом глинистой воды; когда коэффициент проницаемости находится между **10-7~10-4 м/с**, то можно использовать как щиты с балансом глинистой воды, так и щит с балансом давления грунта.

Согласно японскому опыту, когда содержание глины в грунте составляет менее 10%, трудно сформировать глинистую пленку и поверхность забоя склонна к обрушению, поэтому не рекомендуется использовать щит с балансом глинистой воды.

### (3) Выбор на основе давления грунтовых вод

Размер частиц пласта и коэффициент проницаемости пласта являются более ограничивающими для щитов с балансом давления грунта, чем для щитов с балансом глинистой воды. Основополагающей причиной этого является то, что выравнивающей средой для давления в щите с балансом давления грунта является шлак, а способом выгрузки шлака – шнековый механизм. Если размер частиц шлака слишком велик, а коэффициент проницаемости слишком высок, возникают два основных последствия: во-первых, потеря воды с поверхности забоя и невозможность установления выравнивания давления; во-вторых, шнековый механизм не может правильно выгружать шлак.

В щите с балансом давления грунта для выгрузки шлака используется винтовой конвейер (*рис. 3-9*). Давление земли постепенно ослабляется грунтовой камерой и винтовым конвейером и должно быть снижено до атмосферного давления, прежде чем оно достигнет шлакового окна винтового конвейера, иначе произойдет фонтанирование. Щит с балансом глинистой воды имеет глинистую пленку для предотвращения потери воды из пласта и шламовый насос для поддержания шлака под давлением, поэтому щит с балансом глинистой воды имеет преимущества, которых нет у щита с балансом давления грунта для высокого давления воды и высокопроницаемых пластов.

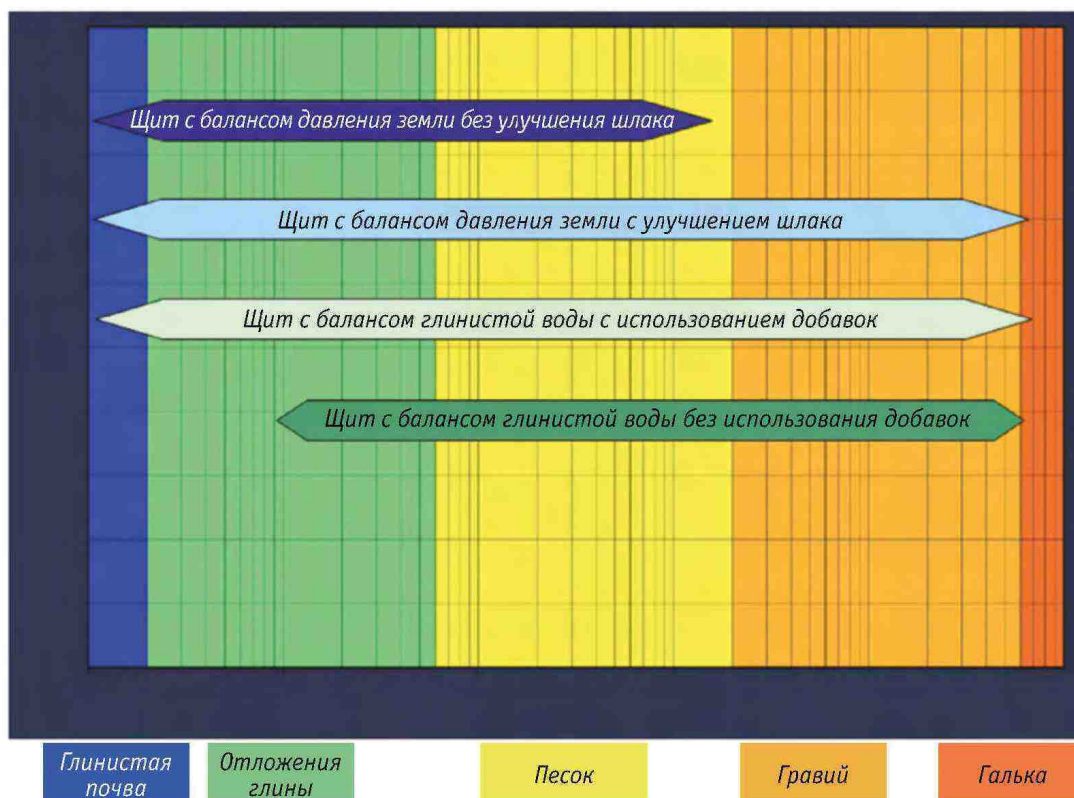


Рис. 3-7. Кривая зависимости типа щита от размера зерна пласта (фактическая)



Рис. 3-8. Взаимосвязь между типом щита и коэффициентом проницаемости пласта

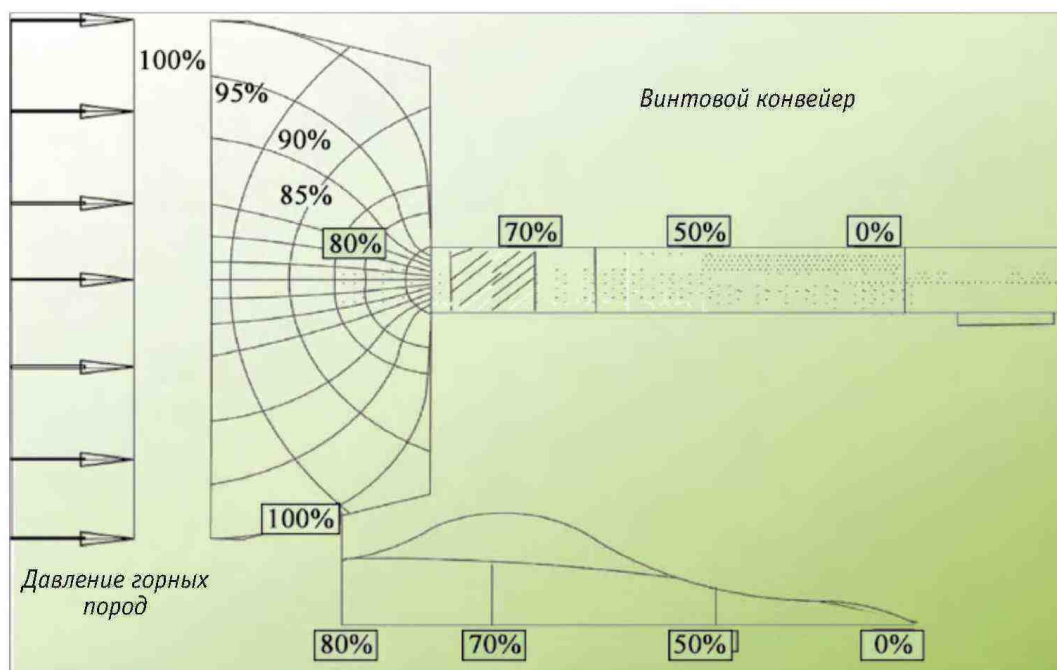


Рис. 3-9. Схематическое изображение снижения давления в щите с балансом давления грунта

В общем, когда давление грунтовых вод меньше 0.3 МПа, предпочтительны щиты с балансом давления грунта; когда давление грунтовых вод больше 0.3 МПа, предпочтительны щиты с балансом глинистой воды.

В частности, следует отметить, что при выборе щита на основе давления грунтовых вод необходимо учитывать конкретные инженерно-геологические условия. Во-первых, когда давление воды превышает 0.3 МПа, следует увеличить длину винтового конвейера или использовать вторичный винтовой конвейер, если по геологическим причинам требуется щит с балансом давления на грунт. Во-вторых, когда эффект улучшения почвы не может удовлетворить эффект закупорки почвы и когда есть обильные грунтовые воды, даже если давление грунтовых вод менее 0.3 МПа, щит с балансом давления на грунт не подходит для использования.

При проведении строительства щитовых туннелей в этом типе пласта, хотя давление подземных вод составляет менее 0.3 МПа, если используется под пластом щит с балансом давления на грунт, шлак и вода находятся в раздельном состоянии и не могут перемещаться по шнековому конвейеру. Шлак в винтовом конвейере не может блокировать декомпрессию, не может сформировать эффект закупорки почвы, даже если использовать двойной винтовой конвейер. Поскольку как только люк винтовой машины откроется для выгрузки шлака, под действием давления воды винтовой конвейер будет вибрировать, в результате чего давление на поверхности забоя не может быть стабилизировано. Если используется насос для удержания давления, хотя давление на поверхности забоя может быть стабилизировано, шлак из шнековой машины содержит большое количество крупнозернистых камней, с которыми не может справиться насос для удержания давления, и шлак не может быть удален.

### *3) Краткий итог по выбору щита*

Щит должен быть выбран на основе устойчивости поверхности забоя, инженерной и гидрологической геологии, размера зерен пластов, коэффициента проницаемости и давления грунтовых вод, а также с учетом практических особенностей конкретного проекта, чтобы гарантировать, что выбранный щит отвечает общим целям «стабильности (балансировки забоя), экскавации (фрезерование забоя грунта) и выгрузки (выгрузки грунта)».

В соответствующих пластах эффективны как щиты с балансом давления на грунт, так и щиты с балансом глинистой воды.

Преимуществами щита с балансом давления грунта являются высокая производительность выгрузки шлака, интуитивный баланс давления в грунтовом отсеке, относительно простое оборудование и эксплуатация; недостатком является то, что он плохо приспособлен к высокому давлению воды, и с его помощью трудно поддерживать стабильность неустойчивых поверхностей забоя и предотвращать потерю воды в высокопроницаемых пластах.

Щит с балансом глинистой воды имеет очевидные преимущества перед щитом с балансом давления грунта в контроле оседания и предотвращении потери воды в пластах, и может работать в пластах с высоким давлением воды и высокой проницаемостью. Недостатки заключаются в том, что он легко образует глинистую корку в глинистой горной породе, легко засоряется и трудно отделяется, легко срывается и разгружается в пластах с большим количеством крупногабаритных объектов, и легко ограничивается мощностью и сроком службы камнедробилки. Кроме того, по сравнению со щитом с балансом давления земли, щит с балансом глинистой воды имеет более высокую стоимость закупки, требования к площадке и уровень строительства.

Однако конкретный выбор должен быть сделан в соответствии с конкретными условиями проекта, и противоречие между теоретической рациональностью и практической возможностью должно быть разрешено. Он должен основываться на размере и распределении размеров грунта, коэффициенте проникновения грунта, давлении грунтовых вод, диаметре отверстия, стабильности поверхности забоя, глубине, стоимости, продолжительности, месте и т. д.

Несмотря на то, что некоторые крупные частицы могут быть отделены от отработанного шлама с помощью просеивания, вихревого потока и седиментации, а отработанный шлам может транспортироваться автотранспортными средствами и лодками, мелкие частицы грунта, находящиеся во взвешенном или полувзвешенном состоянии в шламе, не могут быть полностью отделены, и эти материалы не могут быть свободно утилизированы, что создает основные трудности при использовании щита с балансом глинистой воды.

Снижение загрязнения для защиты окружающей среды является очень важным вопросом, стоящим перед выбором щита с балансом глинистой воды, и необходимо решить, как предотвратить сброс этих шламов в водные объекты: реки, озера и моря, чтобы не вызвать масштабное и серьезное загрязнение. В той мере, в какой утилизируемый шлам может быть тщательно обработан как твердые материалы для транспортировки, это также возможно, и есть много успешных примеров как в стране, так и за рубежом, но это нелегко сделать, потому что: во-первых, оборудование для обработки является дорогостоящим и увеличивает инвестиции в проект; во-вторых, участок, используемый для установки этого оборудования, должен быть больше; и в-третьих, время обработки больше.

Участки щитового строительства обычно длинные, и сложность инженерной геологии в основном отражается в изменчивости свойств окружающих пород и инженерно-геологических характеристик. На участке строительства щита или на участке подряда на строительство щита условия строительства некоторых участков подходят для щита с балансом давления грунта, но некоторые участки подходят для щита с балансом глинистой воды. Выбор щита должен быть обдуманным, а наилучший вариант должен быть выбран после анализа рисков различных вариантов.

В соответствии с механизмом балансировки забоя котлована, использование щитов с балансом глинистой воды более эффективно, чем щиты с балансом давления грунта, с точки зрения поддержания стабильности забоя котлована и контроля осадки грунта, особенно при работе под водоемами, под зданиями или сооружениями, а также в мягких и твердых пластах. В этих особых условиях безопасность строительного процесса является чрезвычайно важным выбором при выборе щита, а использование грязевых и водяных щитов может также снизить строительные риски, вызванные большими колебаниями геологии.

В случаях, когда ни щиты с балансом давления грунта, ни щиты с балансом глинистой воды не могут удовлетворить требованиям устойчивости поверхности забоя, следует рассмотреть возможность применения многорежимных щитов.

#### **3.2.4. Расчет нагрузки на щит**

Расчет механических параметров для щитовой проходки является очень сложным вопросом, на который влияет целый ряд факторов, таких как геологические факторы, методы улучшения грунта и параметры проходки. В процессе выбора щита очень важен расчет основных технических параметров, таких как крутящий момент фрезы и тяга двигательной установки.

##### *1) Давление грунта*

Давление грунта является одной из важных нагрузок, которые необходимо учитывать при проектировании оболочки щита, при этом необходимо учитывать как статическое, так и динамическое давление грунта. В процессе выемки грунта возникает очень сложное динамическое давление грунта из-за выемки и опоры, в то же время существуют различные степени перекопа (избыточной экскавации) и криволинейные участки забоя. Давление грунта, действующее на оболочку щита, является сложным и трудно поддается точному расчету, но расчеты могут быть выполнены обычным способом. Влияние воды должно учитываться следующим образом в зависимости от условий окружающей породы, то есть почва и вода должны быть разделены или вода должна рассчитываться как часть почвы.

Вертикальное давление грунта можно рассматривать как равномерную нагрузку, действующую на верхнюю часть оболочки щита. Величина вертикального давления грунта связана с толщиной обделки туннеля, формой поперечного сечения туннеля, внешним диаметром и состоянием породы. Горизонтальное давление грунта действует на обе стороны оболочки щита и может рассматриваться как распределенная нагрузка, действующая горизонтально. Величина горизонтального давления грунта рассчитывается на основе коэффициентов вертикального давления грунта и бокового давления грунта. Устойчивость фундамента к деформации может не учитываться при проектировании оболочки щита.

#### 2) Гидравлическое давление

Уровень грунтовых вод следует определять с учетом его изменений во время строительства при проектировании щитового корпуса. Гидравлическое давление в вертикальном направлении можно рассматривать как равномерно распределенную нагрузку. Давление воды, действующее на верхнюю часть щита, равно гидростатическому давлению, действующему на его вершину; давление воды, действующее на нижнюю часть щита, равно гидростатическому давлению, действующему в самой нижней точке щита. Гидравлическое давление в горизонтальном направлении можно рассматривать как распределенную нагрузку. Величина давления воды в горизонтальном направлении равна вертикальному гидростатическому давлению в соответствующей точке.

3) *Собственный вес щита* В дополнение к собственному весу основного корпуса щита при проектировании оболочки щита следует также учитывать силы реакции грунта, создаваемые собственным весом основного корпуса щита. Сила реакции на грунт, создаваемая собственным весом корпуса щита, может быть рассчитана по формуле 3-1:

$$P_g = \frac{W}{DL}$$

(3-1),

где:  $P_g$  – сила реакции грунта, создаваемая собственным весом корпуса щита (кН/м<sup>2</sup>);

$W$  – сила тяжести корпуса щита (кН);

$D$  – внешний диаметр корпуса щита (м);

$L$  – длина корпуса щита (м).

Собственный вес – это вертикальная нагрузка, распределенная вдоль оси корпуса щита.

#### 4) Нагрузка вскрышных пород

Нагрузка вскрышных пород – это напряжение на почву, вызванное нагрузкой, действующей на поверхность земли или силой реакции фундамента здания и т. д. Влияние нагрузки вскрышных пород на конструкцию щитовой оболочки уменьшается с увеличением глубины. Можно предположить, что влияние нагрузки от вскрышных пород на давление грунта, действующее на оболочку щита, также уменьшается по мере увеличения расстояния от точки приложения нагрузки.

Влияние нагрузки от вскрышных пород на давление на грунт может меняться в зависимости от величины нагрузки, формы фундамента, толщины вскрышных пород от нижней границы фундамента здания и характеристик грунта, что затрудняет точное определение. Влияние

нагрузки вскрышных пород на щит может быть рассчитано по формуле Буссинеска в механике упругости или численно с использованием метода конечных элементов.

#### 5) Переменная нагрузка

Когда щитовая машина прокладывает туннель или корректирует направление в криволинейной части туннеля, щитовая оболочка подвергается сопротивлению фундамента со стороны окружающей породы в равновесии с эксцентриковой тягой, что называется переменной нагрузкой. Величина и распределение переменной нагрузки зависят от условий, но максимальное значение обычно имеет сопротивление фундамента, когда пассивное давление грунта приложено к половине щитовой оболочки или когда силовой цилиндр используется для продвижения только половины щитовой оболочки. Диаграмма переменной нагрузки показана на *рис. 3-10*. Пример расчета переменной нагрузки показан на *рис. 3-11*. Для щита с балансом давления грунта давление перед забоем является давлением грунта; для щита с балансом глинистой воды с высокой концентрацией глинистого раствора давление перед забоем – это давление глинистого раствора. Для щита с балансом глинистой воды давлением глинистого раствора перед забоем является давление глинистого раствора (пены) и давление грунта. Для щитов с ручной выемкой или щитов закрытого типа давление перед забоем – это силовой гидравлический цилиндр подпорной пластины на решетке. Противодействующей силой является гидравлический цилиндр фиксатора на решетке.

Давление перед забоем – это нагрузка, действующая на стенку земляной камеры (барокамера) (поперечное уплотнение между срезным кольцом и опорным кольцом), а также на арматурные балки опорного кольца, колонны, рабочей платформы и т. д.

Тяга гидроцилиндров, необходимая для поддержания устойчивости поверхности забоя, передается через стенки грунтового отсека рабочей среде (воздух, грунтовый раствор, грунт) внутри отсека. Максимальное избыточное давление рабочей среды в грунтовом отсеке обычно составляет  $3 \times 105 \text{ Па}$ , и может быть больше  $3 \times 105 \text{ Па}$ , если существуют специальные требования, но когда ремонтный персонал должен проводить работы с газом под давлением в грунтовом отсеке, следует использовать подходящее значение избыточного давления согласно соответствующим требованиям. Расчетная нагрузка перегородки под давлением отражена в *таблице 3-4*.

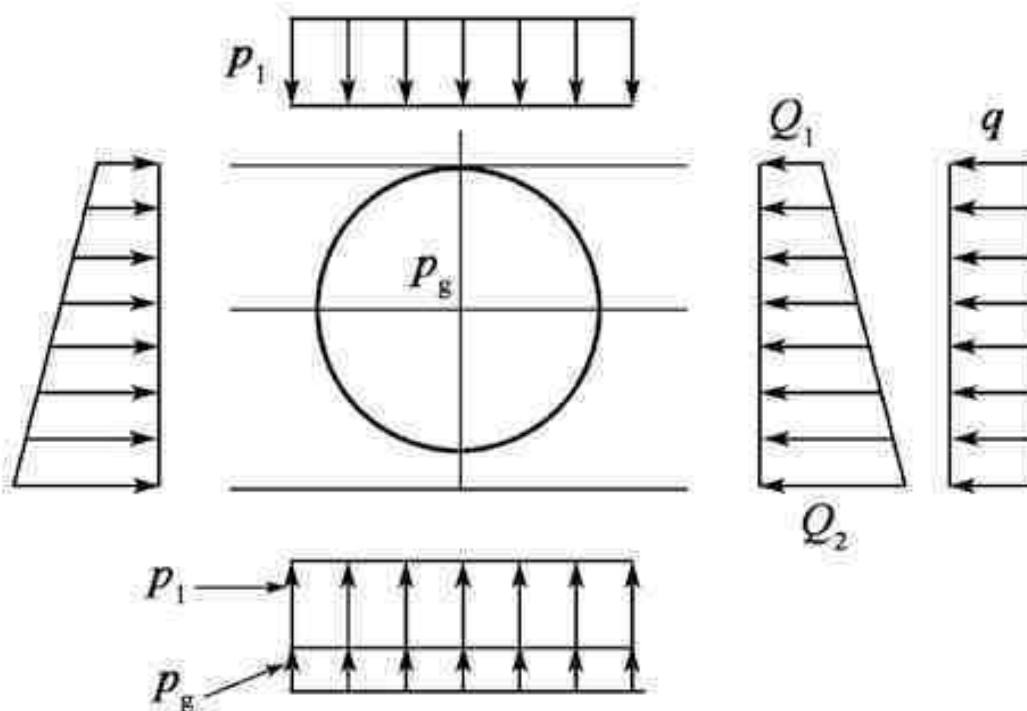


Рис. 3-10. Диаграмма нагрузки при общем методе расчета

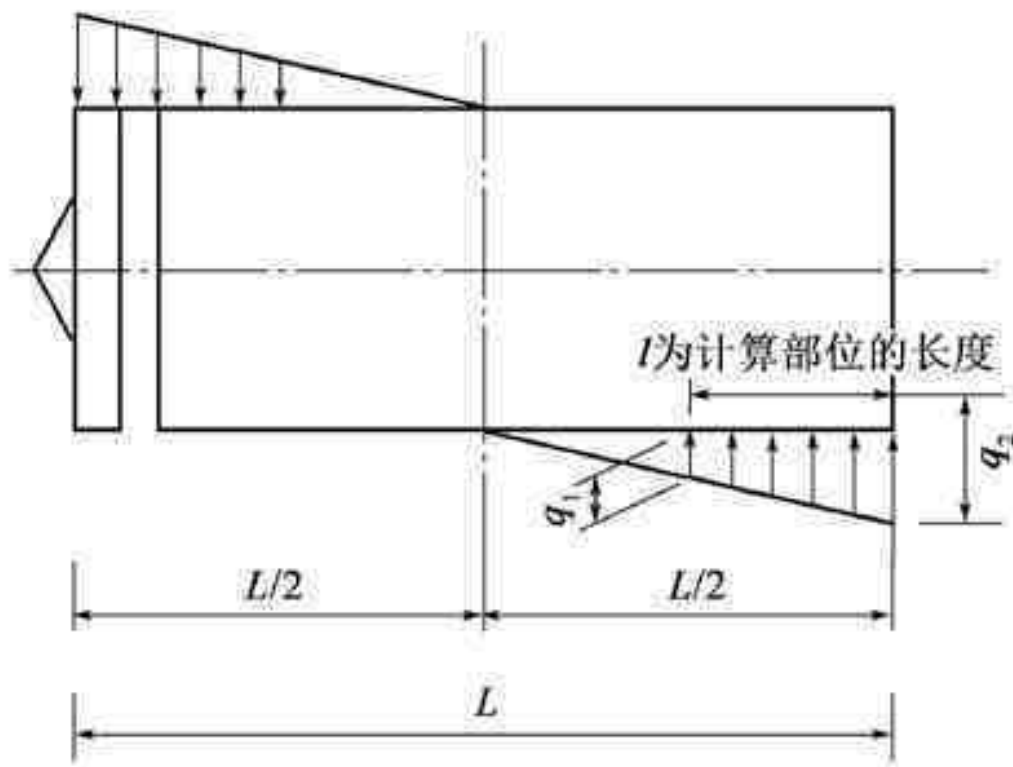


Рис.3-11. Пример расчета переменных нагрузок

- $p_1$  – вертикальное давление на грунт;
  - $p_g$  – сила реакции собственного веса щита;
  - $Q_1$  – горизонтальное давление на грунт, равнодействующее гидростатическое давление в верхней части туннеля;
  - $Q_2$  – горизонтальное давление на грунт, равнодействующее гидростатическое давление в нижней части туннеля
  - $q$  – переменная нагрузка;
  - $q_1, q_2$  – переменная нагрузка на обоих концах рассчитываемой детали, равнодействующее гидростатическое давление;
- Примечание:  $q = (q_1 + q_2) / 2$ .

Таблица 3-4. Расчетные нагрузки для напорных земляных перемычек

| Тип щитовой проходки                               | Рабочая камера щита | Нагрузка, необходимая для обеспечения работы |                                               |                    |
|----------------------------------------------------|---------------------|----------------------------------------------|-----------------------------------------------|--------------------|
|                                                    |                     | Давление в перегородке                       | Забой туннеля                                 | Разделение отсеков |
| Щит с балансом глинистой воды                      |                     |                                              | Как и в случае с герметическими перегородками |                    |
| Щит с балансом глинистой воды с воздушной подушкой |                     |                                              |                                               |                    |
| Щит сжатого воздуха                                |                     |                                              | Как и в случае с герметическими перегородками | Без нагрузки       |
| Щит с балансом давления грунта                     |                     |                                              | Как и в случае с герметическими перегородками | —                  |
| Техническое обслуживание и ремонт под давлением    |                     |                                              | Как и в случае с герметическими перегородками | Без нагрузки       |

### 3.2.5. Проектирование основных параметров

#### 1) Внешний диаметр оболочки щита $D$

Наружный диаметр оболочки щита равен наружному диаметру основного корпуса щитового блока, за исключением выступающих частей (например, инструментов для избыточной экскавации, трубопровод для послестенной цементации и т. д.). Диапазон экскавации инструментов для избыточной экскавации показан на рис. 3-12.

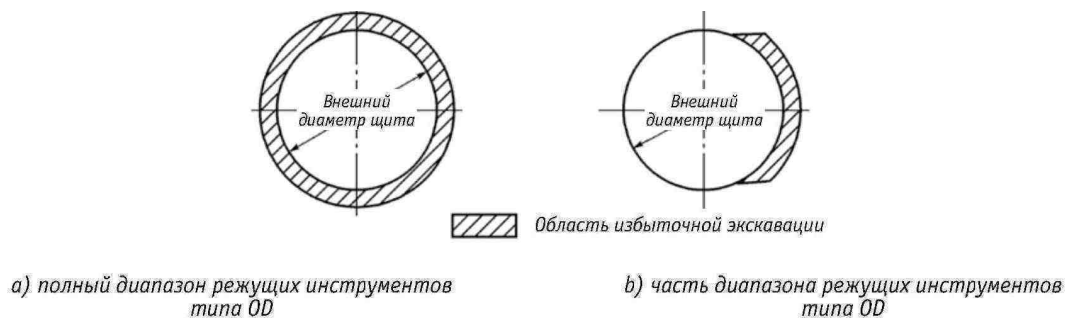


Рис. 3-12. Диапазон экскавации инструментов для избыточной экскавации

Наружный диаметр оболочки щита ( $D$ ) должен быть рассчитан на основе наружного диаметра кольца футерованного тубинга ( $D_0$ ), толщины хвостовой пластины щита ( $t$ ) и зазора ( $b$ ) между внутренней поверхностью стенки хвостовой пластины щита и внешней поверхностью стенки кольца футерованного тубинга, то есть:

$$D = D_0 + 2 \times (b + t)$$

(3-2),

Минимальное допустимое отклонение, необходимое для контроля ориентации при прокладке туннелей в изогнутых щитовых конструкциях, можно рассчитать по следующему уравнению:

$$b_1 = \frac{\delta}{2}$$

(3-3)

где:  $\delta$  – см. рис. 3-13. Значение отклонения  $\delta$  может быть рассчитано по следующему уравнению:

$$\delta = R - \frac{D_0}{2} \times (1 - \cos \beta)$$

(3-4),

Рис. 3-13. Схематическое изображение отклонения  $\delta$ :  $R$  – радиус кривой на осевой линии изогнутого туннеля;  $\beta$  – угол врезания кольца облицовки изогнутого туннеля в хвостовую пластину щита;  $R + D_0/2$  – внешний диаметр кольца футерованного тубинга, образующий изогнутый туннель;  $R - D_0/2$  – внутренний диаметр кольца футерованного тубинга, образующий изогнутый туннель;  $l$  – длина изогнутого кольца футерованного тубинга, врезающегося в пластину хвостовой части оболочки щита

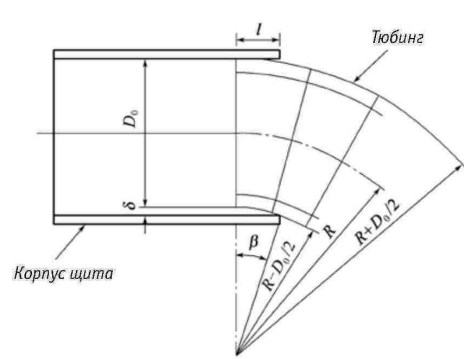


Рис. 3-13. Схематическое изображение отклонения  $\delta$ :  $R$  – радиус кривой на осевой линии изогнутого туннеля;  $\beta$  – угол врезания кольца облицовки изогнутого туннеля в хвостовую пластину щита;  $R + D_0/2$  – внешний диаметр кольца футерованного тубинга, образующий изогнутый туннель;  $R - D_0/2$  – внутренний диаметр кольца футерованного тубинга, образующий изогнутый туннель;  $l$  – длина изогнутого кольца футерованного тубинга, врезающегося в пластину хвостовой части оболочки щита

Если толщина крепежной пластины уплотнительного устройства между внутренней стенкой пластины оболочки хвостовика щита и внешней поверхностью стенки кольца вкладыша равна  $b_2$ , то  $b = b_1 + b_2$ . Для значения  $b$  в основном используются фактические данные от 20 до 45 мм, или  $D_0/125$ . Для щитовых корпусов с композитными пластинами или щитовых корпусов для туннелей с малым радиусом кривой ( $R < 250$  м) и шириной трубы  $B \leq 1.5$  м, целесообразно использовать большее значение  $b$ .

## 2) Диаметр щитовой выемки

Следует учитывать диаметр выемки фрезы, чтобы обеспечить правильный диаметр выемки даже после износа наружного кольца фрезы. При строительстве на мягком грунте диаметр выемки режущей пластины обычно больше внешнего диаметра переднего щита на 0–10 мм; при строительстве на песчано-галечном грунте или твердом скальном грунте износ режущей пластины более серьезен, и диаметр выемки режущей пластины обычно должен быть больше внешнего диаметра переднего щита на 30 мм.

## 3) Общая длина корпуса щита ( $L$ )

Общая длина корпуса щита  $L$ , для щитов с уравновешенным давлением земли – это общая длина от лопасти передней стороны режущего инструмента до конца винтового конвейера, для щитов с балансом глинистой воды – это общая длина от лопасти передней стороны режущего инструмента до торцевой поверхности щита.

Длина корпуса щита  $LM$  равна сумме длины срезного кольца, опорного кольца и хвостовой части щита.

Общая длина корпуса щита определяется исходя из инженерно-геологических и гидро-геологических условий пластов, условий прокладки туннеля (включая диаметр поперечного сечения, максимальный продольный уклон и минимальный радиус кривой), длины центрального гибочного устройства (длина опорного кольца должна учитывать длину центрального гибочного устройства), а также формы и ширины конструкции тубингов.

Отношение общей длины  $L$  корпуса щита к наружному диаметру  $D$  оболочки щита обычно называют коэффициентом чувствительности щита; величина отношения  $L/D$  может отражать способность управления положением корпуса щита при проходке криволинейного туннеля.

Взаимосвязь между  $L$  и  $D$  показана на рис. 3-14. Из рисунка видно, что когда внешний диаметр  $D$  оболочки корпуса щита  $< 7$  м,  $L/D \geq 1$ , то чем меньше внешний диаметр  $D$  оболочки

щита, тем больше отношение  $L/D$ . Когда внешний диаметр  $D$  оболочки щита корпуса щита  $> 7$  м,  $L/D < 1$ , то чем больше внешний диаметр  $D$  оболочки щита, тем меньше отношение  $L/D$ . Как правило, отношение  $L/D$  составляет не менее 0.4. Отношение  $L/D$  группы щитов с композитными пластинами обычно немного больше, чем у щитов с мягким грунтом.

Длина срезного кольца  $LH$  должна определяться в соответствии с инженерно-геологическими и гидрогеологическими условиями вынимаемых пластов. Для щитов из композитных пластов пространство срезного кольца должно быть достаточным для формирования камеры с глинистой водой для щитов с балансом давлением грунта или щитов с балансом глинистой воды, поэтому объем грунта должен определяться в зависимости от его характеристик (форма, размер частиц) и скорости копания, а затем длина срезного кольца  $LH$  должна определяться в зависимости от объема камеры с глинистой водой. Для щита с ручной выемкой основной функцией срезного кольца является обеспечение безопасности оператора в пространстве срезного кольца, поэтому  $LH$  и форма конструкции зависят от условий грунта. Если условия грунта нестабильны, на вершине срезного кольца, на верхнем карнизе, может быть установлено расширение (верхний карниз может иметь телескопическую форму).

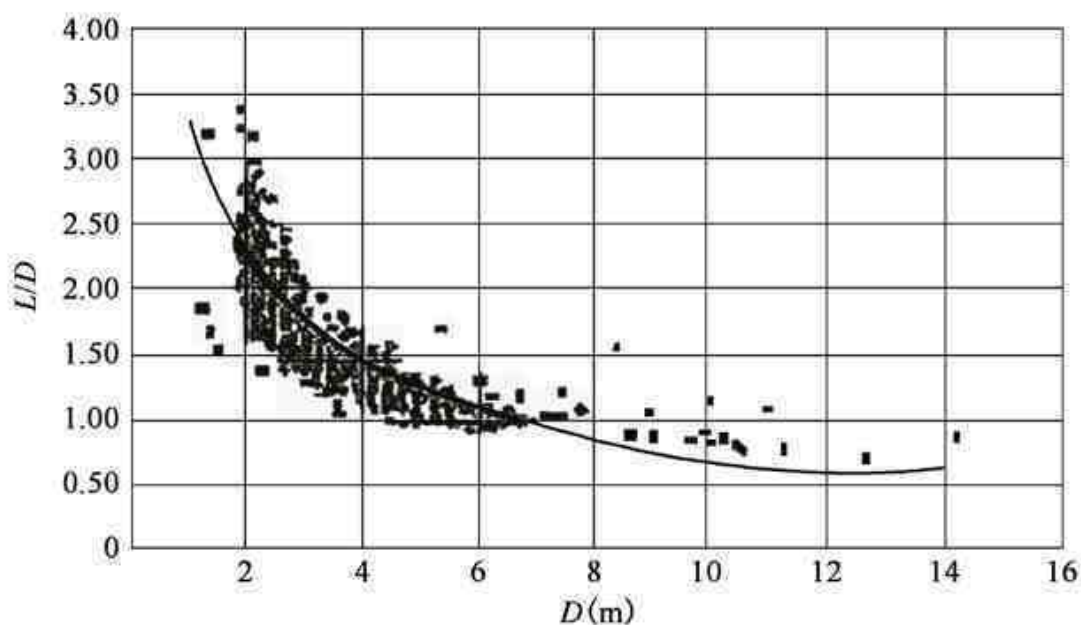


Рис. 3-14. Соотношение между общей длиной  $L$  корпуса щита и внешним диаметром  $D$  оболочки щита

Для щитов, выкапывающих вручную, длина опорного кольца  $LG$  определяется длиной силового гидроцилиндра и требуемым ходом штока поршня, то есть связана с шириной кольца футеровочного тубинга. Для щитов из композитных пластов  $LG$  не только учитывает длину силового гидроцилиндра и требуемый ход штока поршня, но также учитывает требования к осевому положению установки такого оборудования, как главный подшипник лопасти, приводное устройство, центральное гибочное устройство, шлюз и шлакоотгрузчик шнекового типа.

Длина щитового хвоста  $LT$  зависит от ширины кольца футерованного тубинга и формы конструкции.  $LT$  должен вмещать от 2 до 2.5 колец футерованного тубинга, чтобы в случае повреждения части кольца футерованного тубинга его можно было отремонтировать в третьем кольце. Кроме того, при большой глубине заложения и высоком давлении воды хвостовая часть щита должна иметь достаточную длину для установки уплотнения хвостовой части щита, чтобы обеспечить хорошую водонепроницаемость на поверхности вырытого туннеля.

$$LT = LJ + C + Ls + C' + LP$$

(3-5),

где: LJ – длина упорного устройства на конце штока силового гидроцилиндра (мм);

Ls – ширина футерованного тубинга, покрытого хвостовой частью щита (мм);

LP – длина установки хвостового уплотнения щита (мм);

C – допустимое отклонение при установке футерованного тубинга; обычно  $C = 100 - 150$  мм (для футеровочных колец с аксиально вставленными уплотнительными блоками длина может быть увеличена в зависимости от угла вставки аксиально вставленных уплотнительных блоков);

C' – другие допустимые отклонения (мм).

4) *Сила тяжести щита W*

Сила тяжести щита – это сумма тяжести всего оборудования, установленного в корпусе щита, отвала, силового гидроцилиндра, шарнирного гидроцилиндра, трубоукладчика, кабины оператора, винтового конвейера (камнедробилки и линии подачи и выгрузки глины для щитов с балансом глинистой воды) и т. д. В общем, взаимосвязь между силой тяжести щита (W) и диаметром щита (D) выглядит следующим образом:

(1) Для щитов, выкопанных вручную или полумеханических щитов:

$$W = ( 25 \sim 40 ) D^2$$

(3-6),

(2) Для механических щитов:

$$W = ( 45 \sim 55 ) D^2$$

(3-7),

(3) Для щитов с балансом глинистой воды:

$$W = ( 45 \sim 65 ) D^2$$

(3-8),

(4) Для щитов с балансом давления грунта:

$$W = (55 \sim 70) D^2$$

(3-9),

где:  $D$  – внешний диаметр щита (м);

$W$  – сила тяжести основного каркаса щита (кН).

5) *Движущая сила щита  $F_e$*

При проектировании движительной установки (пропульсивной установки) щита рассматриваются следующие основные элементы сопротивления:

Сопротивление оболочки щита окружающим пластам во время продвижения щита –  $F_1$ , сопротивление продвижению лопастной панели –  $F_2$ , сопротивление трению между тубингом и хвостовой частью щита –  $F_3$ , сопротивление проникновению срезного кольца в пласт –  $F_4$ , сопротивление повороту (конструкция кривой и отклонение) –  $F_5$ , буксировочное сопротивление соответствующего прицепа после буксировки –  $F_6$ . Тяга должна быть с достаточным запасом, общая тяга обычно в 1.5 – 2 раза больше общего сопротивления.

$$F_e = AF_d$$

(3-10),

где:  $F_e$  – суммарная тяга щитового оборудования (кН);

$A$  – коэффициент запаса прочности, обычно от 1.5 до 2;

$F_d$  – общее сопротивление продвижению щита,  $F_d = F_1 + F_2 + F_3 + F_4 + F_5 + F_6$ .

Иногда  $F_d$  также можно оценить по следующей формуле:

$$F_d = 0.25\pi D^2 P_J$$

(3-11),

где:  $D$  – внешний диаметр щита (м).

$P_J$  – эмпирическая тяга на единицу вынимаемой поверхности, то есть удельная тяга; обычно 700 – 1100 кН·м<sup>2</sup> для открытых щитов и 1000 – 1500 кН·м<sup>2</sup> для щитов с закрытым забоем.

(1) Периферийная сила реакции во время продвижения щита  $F_1$

1. Для песчаной почвы:

$$(F_1 = 0.25\pi DL (2P_e + 2KP_e + K\gamma D) \mu_1 + W\mu_1)$$

(3-12),

где:  $F_1$  – сила периферийной реакции при продвижении щита, то есть сопротивление трения между корпусом щита и окружающими пластами (кН).

$D$  – внешний диаметр щита (м);

$L$  – общая длина щита (м);

$P_e$  – сила вертикального давления грунта, действующая на верхнюю часть щита (кПа);

$K$  – коэффициент статического давления грунта на забой;

$\gamma$  – плавающий вес грунта на забое (кН·м<sup>3</sup>);

$\mu_1$  – коэффициент трения между пластом и оболочкой щита; обычно принимается равным  $\mu_1 = 1/2 \tan \varphi$ , где  $\varphi$  – угол трения в почве;

$W$  – сила тяжести основного каркаса щита (кН).

Его также можно оценить по следующей формуле:

$$F_1 = \mu_1 (\pi D L P_m + W)$$

(3-13),

где  $F_1$  – периферийная сила реакции во время продвижения щита (кН);

$\mu_1$  – коэффициент трения между пластами и корпусом щита;

$D$  – внешний диаметр щита (м);

$L$  – общая длина корпуса щита (м);

$P_m$  – среднее давление грунта, действующее на щит (кПа);

$W$  – Сила тяжести основного каркаса щита (кН).

2. Для глинистых почв

$$F_1 = \pi D L c$$

(3-14),

где:  $D$  – внешний диаметр щита (м);

$L$  – общая длина корпуса щита (м);

$c$  – связность грунта на забое (кПа).

(2) Сопротивление продвижению режущей пластины  $F_2$

Для ручных и полумеханических щитов сопротивление движению в основном представляет собой силу реакции опоры на поверхности забоя, а для механических и закрытых щитов

– это сопротивление движению, действующее на резец, и давление в почвенном отсеке, соответственно, рассчитываемое по следующему уравнению:

$$F_2 = 0.25\pi^2 P_f$$

(3-15),

где  $F_2$  – сопротивление продвижению лопастной панели (кН);

$D$  – внешний диаметр щита (м);

$P_f$  – давление перед выемкой грунта; щит с балансом глинистой воды – расчетное давление глинистой воды в грунтовом отсеке; щит с балансом давления грунта – расчетное давление грунта в грунтовом отсеке (кПа).

(3) Сопротивление трению между тубингом и хвостовой частью щита  $F_3$

$$F_3 = n_1 W_s \mu_2 + \pi D_s b P_t n_2 \mu_2$$

(3-16),

где:  $F_3$  – сопротивление трению между тубингом и хвостовой частью щита (кН);

$n_1$  – количество колец тубингов в хвосте щита;

$W_s$  – сила тяжести тубингового кольца (кН);

$\mu_2$  – коэффициент трения между щеткой и тубингом (обычно от 0.3 до 0.5);

$D_s$  – внешний диаметр тубинга (м);

$b$  – длина контакта между каждой щеткой и тубингом (м);

$P_t$  – давление смазки внутри щетки (кПа);

$n_2$  – количество слоев хвостовой щетки щита.

(4) Сопротивление проникновению срезного кольца в пласт  $F_4$

1. Для песчаных почв:

$$F_4 = \pi (D_2 - D_i^2) P_3 + \pi D t K_p P_m$$

(3-17),

где:  $F_4$  – сопротивление проникновению срезного кольца в пласт (кН);

$D$  – внешний диаметр переднего щита (м);

- $D_i$  – внутренний диаметр переднего щита (м);  
 $P_3$  – среднее давление грунта при установке срезного кольца (кПа);  
 $t$  – глубина внедрения срезного кольца в пласт (м);  
 $K_p$  – коэффициент пассивного давления на грунт;  
 $P_m$  – среднее давление грунта, действующее на щит (кПа).  
2. Для глинистых почв:

$$F_4 = \pi (D_2^2 - D_i^2) P_3 + \pi D t c$$

(3-18),

- где:  $C$  – связность грунта у забоя (кПа).  
Остальные показатели имеют то же значение, что и раньше.  
(5) Сопротивление повороту  $F_5$

$$F_5 = RS$$

(3-19),

- где:  $F_5$  – сопротивление повороту, также известное как переменное сопротивление (кН);  
 $R$  – давление сопротивления грунта (пассивное давление грунта) (кПа);  
 $S$  – проектная площадь плиты сопротивления в направлении выемки (м<sup>2</sup>).

Сопротивление повороту существует только при строительстве кривой. Поскольку расчет проектируемой площади сопротивления в направлении выемки сложен, сопротивление повороту обычно не рассчитывается, но при определении общей тяги следует учитывать такие факторы, как подъем, строительство кривой, прогиб при строительстве щита, поэтому необходимо делать поправки на показатели.

- (6) Буксировочное сопротивление соответствующего прицепа после буксировки  $F_6$

$$F_6 = W_b \mu_3$$

(3-20),

- где:  $F_6$  – буксировочное сопротивление соответствующего прицепа после буксировки;  
 $\mu_3$  – коэффициент трения между задним опорным прицепом и дорожкой качения;  
 $W_b$  – общая сила тяжести задней части прицепа и оборудования на прицепе (кН).

б) Крутящий момент фрезы

Расчет крутящего момента фрезы сложен. Крутящий момент при погружении фрезы в грунт обычно состоит из сопротивления почвы резанию (используется для преодоления сопротивления почвы резанию), сопротивления вращению фрезы (используется для преодоления сопротивления трения с почвой), реакции от осевой нагрузки на фрезу, трения от уплотнительного устройства, трения на передней поверхности фрезы, трения за фрезой, сдвига при открывании фрезы и отталкивания при давлении почвы.

T<sub>1</sub> – расчетная составляющая крутящего момента режущего инструмента включает в себя крутящий момент режущего инструмента; T<sub>2</sub> – собственный вес фрезы создает крутящий момент подшипника; T<sub>3</sub> – крутящий момент подшипника из-за осевой нагрузки на фрезу; T<sub>4</sub> – момент трения уплотнительного устройства; T<sub>5</sub> – фрикционный крутящий момент на передней поверхности фрезы; T<sub>6</sub> – фрикционный крутящий момент на окружности фрезы; T<sub>7</sub> – фрикционный крутящий момент на задней поверхности фрезы; T<sub>8</sub> – момент срезания паза отверстия фрезы. Расчетный крутящий момент фрезы T является суммой вышеуказанных компонентов. Коэффициент запаса крутящего момента обычно составляет 1.5 – 2. В то же время, согласно зарубежному опыту проектирования щитов, крутящий момент фрезы может быть оценен по следующей формуле:

$$T = K_{\alpha} D^3$$

(3-21),

где: K<sub>α</sub> – коэффициент крутящего момента относительно диаметра лопасти; в общем случае K<sub>α</sub> = от 14 до 23 для щитов с балансом давления грунта и K<sub>α</sub> = от 9 до 18 для щитов с балансом глинистой воды.

Расчет каждого компонента крутящего момента выполняется следующим образом:

(1) Крутящий момент резания фрезы T<sub>1</sub>:

$$T_1 = n q_u h_{max} D^2 n^2$$

(3-22),

где: T<sub>1</sub> – крутящий момент резания фрезы (кН•м);

n – скорость вращения фрезерной головки (об/мин);

q<sub>u</sub> – прочность на сжатие срезаемого грунта (кПа);

h<sub>max</sub> – проникновение, то есть глубина реза за один оборот фрезы (м); h<sub>max</sub> = V / n, V – скорость движения (м/ч);

D – диаметр диска фрезы (м).

(2) Собственный вес фрезы создает крутящий момент подшипника T<sub>2</sub>

$$T_2 = W_c R_1 \mu_g$$

(3-23),

где:  $W_c$  – вес резца (кН);

$R_1$  – радиус качения коренного подшипника (м);

$\mu_g$  – коэффициент трения качения подшипника.

(3) Крутящий момент подшипника из-за осевой нагрузки на фрезу Т3:

$$T_3 = P_t R_1 \mu_g$$

(3-24),

где:  $P_t$  – осевая нагрузка на фрезу;

Остальные показатели имеют то же значение, что и раньше.

$$P_t = \alpha \pi \left( \frac{D}{2} \right)^2 P_d$$

(3-25),

где:  $\alpha$  – скорость, при которой клапан не открывается,  $\alpha = 1 - A_s$ , где  $A_s$  – скорость, при которой клапан открывается;

$D$  – диаметр диска фрезы (м);

$P_d$  – активное давление грунта на переднюю сторону щита (кПа).

(4) Момент трения уплотнительного устройства Т4:

$$T_4 = 2\pi \mu_m F_m (n_1 R_{m1}^2 + n_2 R_{m2}^2)$$

(3-26),

где:  $\mu_m$  – коэффициент трения между уплотнением коренного подшипника и сталью, обычно принимается равным  $\mu_m = 0.2$ ;

$F_m$  – тяга уплотнения (кПа);

$n_1$  – количество внутренних уплотнений;

$n_2$  – количество внешних уплотнений;

$R_{m1}$  – радиус внутреннего уплотнения (м);

$R_{m2}$  – радиус наружного уплотнения (м).

(5) Фрикционный крутящий момент на передней поверхности фрезы T5:

$$T_5 = 2\alpha n_1 \mu_1 R_c^3 \frac{P_d}{3}$$

(3-27),

где:  $\alpha$  – скорость, при которой клапан не открывается;

$\mu_1$  – коэффициент трения между почвой и фрезой;

$R_c$  – радиус резца фрезы (м);

$P_d$  – активное давление грунта на переднюю сторону щита (кПа).

(6) Фрикционный крутящий момент на окружности фрезы T6:

$$T_6 = 2\pi R_c B P_z \mu_1$$

(3-28),

где:  $R_c$  – радиус резца фрезы (м);

$B$  – толщина периметра фрезы (м);

$P_z$  – среднее давление грунта по окружности фрезы (кПа);

$\mu_1$  – коэффициент трения между почвой и фрезой.

(7) Фрикционный крутящий момент на задней поверхности фрезы T7:

Фрикционный крутящий момент на задней поверхности фрезы T7 создается давлением грунта  $P_w$  в грунтовой отсеке и рассчитывается как:

$$T_7 = 2\alpha n_1 \mu_1 R_c^3 \frac{P_w}{3}$$

(3-29),

где:  $\alpha$  – скорость, при которой клапан не открывается;  
 $\mu_1$  – коэффициент трения между почвой и фрезой;  
 $R_c$  – радиус резца фрезы (м);  
 $P_w$  – заданное давление грунта в грунтовой камере (кПа).  
 (8) Момент срезания паза отверстия фрезы Т8:

$$T_8 = 2\alpha\pi\tau R_c^3 \frac{A_8}{3}$$

(3-30),

где:  $\tau$  – сила сдвига фрезы;  
 $R_c$  – радиус резца фрезы (м);  
 $A_8$  – скорость открывания фрезы.

$$\tau = C + P_w \tan\varphi$$

(3-31),

где:  $C$  – связность грунта у забоя (кПа);  
 $\varphi$  – угол внутреннего трения грунта в камере; в случае щита с балансом глинистой воды это смесь ила и глинистой воды, угол внутреннего трения обычно принимается равным  $\varphi = 5^\circ$ .  
 $P_w$  – установленное давление грунта (кПа) в грунтовой камере, или давление глинистой воды в случае щита с балансом глинистой воды.

7) Мощность главного привода  $W_0$

$$W_0 = \frac{A_w T \omega}{n}$$

(3-32),

где:  $W_0$  – мощность системы главного привода (кВт);  
 $A_w$  – коэффициент запаса мощности, обычно от 1.2 до 1.5;  
 $T$  – номинальный крутящий момент фрезы (кН·м);  
 $\omega$  – угловая скорость фрезы,  $\omega = 2\pi n/60$ ,  $n$  – скорость вращения фрезерной головки (об/мин);  
 $\eta$  – эффективность системы главного привода.  
 8) КПД двигательной установки  $W_f$

$$W_f = \frac{A_w F V}{\eta_w}$$

(3-33),

где:  $W_f$  – мощность двигательной установки (кВт);  
 $A_w$  – коэффициент запаса мощности, обычно от 1.2 до 1.5;  
 $F$  – максимальная тяга (кН);  
 $V$  – максимальная скорость движения (м/ч);  
 $\eta_w$  – КПД двигательной установки;  $\eta_w = \eta_{pm} \eta_{pv} \eta_s$ ,  $\eta_{pm}$  – механический КПД двигателя насоса,  $\eta_{pv}$  – объемный КПД двигателя насоса,  $\eta_s$  – КПД муфты сцепления валов.  
 9) *Возможность одновременного использования системы цементирования*  
 (1) Теоретический объем цементации на одно кольцо тубинга  $Q$

$$Q = 0.25\pi (D^2 - D_s^2) L$$

(3-34),

где:  $Q$  – строительная пустота на кольцо тубинга, то есть теоретический объем цементации на кольцо тубинга (м<sup>3</sup>);  
 $D$  – диаметр забоя (м);  
 $D_s$  – внешний диаметр тубинга;  
 $L$  – ширина тубинга (м).  
 (2) Минимальное время продвижения каждого цикла  $t$

$$t = \frac{L}{V}$$

(3-35),

где: L – длина пласта (м);

V – максимальная скорость движения (м/ч).

(3) Теоретическая мощность цементации t

$$q = \frac{Q}{t} = 0.25\pi V (D^2 - D_s^2)$$

(3-36),

где: q – теоретическая производительность синхронной цементационной системы (м<sup>3</sup>/ч);

D – диаметр забоя(м);

D<sub>s</sub> – внешний диаметр трубного листа (м);

V – максимальная скорость движения (м/ч).

(4) Номинальная производительность цементирования

Номинальная производительность синхронного цементировочного насоса q<sub>p</sub> учитывает скорость закачки пласта λ и производительность цементировочного насоса η и определяется по формуле:

$$q_p = \frac{\lambda q}{\eta} = \frac{0.25\pi\lambda V (D^2 - D_s^2)}{\eta}$$

(3-37),

где: λ – коэффициент стратиграфической закачки, варьируется в зависимости от пласта, обычно 1.5 ~ 1.8;

D – диаметр забоя (м);

D<sub>s</sub> – внешний диаметр тубинга (м);

V – максимальная скорость движения (м/ч);

$\eta$  – производительность шламового насоса.

10) Система транспортировки глинистой воды

(1) Гидродинамометр глинистой воды

1. Извлеченный расход грунта  $Q_E$

$$Q_E = 0.25\pi D^2 V$$

(3-38),

где:  $Q_E$  – расход грунта в забое (м<sup>3</sup>/ч);

$D$  – диаметр забоя (м);

$V$  – максимальная скорость движения (м/ч).

2. Скорость бурового раствора на выходе  $Q_2$

$$Q_2 = Q_E \frac{\rho_E - \rho_1}{\rho_2 - \rho_1}$$

(3-39),

где:  $Q_2$  – расход бурового раствора (м<sup>3</sup>/ч);

$Q_E$  – расход извлеченного грунта (м<sup>3</sup>/ч);

$\rho_E$  – плотность извлеченного грунта (т/м<sup>3</sup>);

$\rho_1$  – плотность подачи бурового раствора (т/м<sup>3</sup>);

$\rho_2$  – плотность разгрузки бурового раствора (т/м<sup>3</sup>).

3. Расход подачи бурового раствора  $Q_1$

$$Q_1 = Q_2 - Q_E$$

(3-40),

где:  $Q_1$  – расход подачи бурового раствора (м<sup>3</sup>/ч);

$Q_2$  – расход сброса бурового раствора (м<sup>3</sup>/ч);

$Q_E$  – расход выемки (м<sup>3</sup>/ч).

Подача и сброс бурового раствора должны учитывать определенный запас, коэффициент запаса обычно составляет 1.2 ~ 1.5. В то же время, принимая во внимание систему транспортировки глинистой воды в режиме байпаса, подачу и сброс бурового раствора равных характери-

стик, при подаче шламового насоса выбор величины его вытеснения не должен быть меньше, чем теоретический поток сброса.

(2) Расчет расхода подачи и сброса бурового раствора

1. Скорость потока в трубе подачи бурового раствора

$$V_1 = \frac{4Q_1}{\pi D_1^2}$$

(3-41),

где:  $V_1$  – скорость потока в трубе подачи бурового раствора (м/ч);

$Q_1$  – расход бурового раствора (м<sup>3</sup>/ч);

$D_1$  – внутренний диаметр трубы для подачи бурового раствора (м).

2. Скорость расхода в грунтопроводе где:

$$V_2 = \frac{4Q_2}{\pi D_2^2}$$

(3-42),

где:  $V_2$  – скорость расхода в грунтопроводе (м/ч);

$Q_2$  – расход сброса бурового раствора (м<sup>3</sup>/ч);

$D_2$  – внутренний диаметр грунтопровода (м).

### 3.3. КОНТРОЛЬ ОСАДКИ ЩИТОВОЙ КОНСТРУКЦИИ

Технология щитовой проходки является одним из наименее нарушающих городское подземное строительство методов, но, как и в случае с другими методами строительства, из-за геологических условий и техники строительства трудно полностью избежать нарушения окружающей среды при щитовом продвижении, и поэтому существует вероятность оседания грунта. В тяжелых случаях может возникнуть угроза безопасности прилегающих зданий, дорог и подземных сетей трубопроводов, что в конечном итоге может привести к серьезным последствиям, как показано на *рис. 3.15* и *рис. 3.16*. Этот раздел посвящен механизму нарушения грунта при строительстве во время щитовой выемки грунта и представляет методы прогнозирования и контроля осадки грунта.



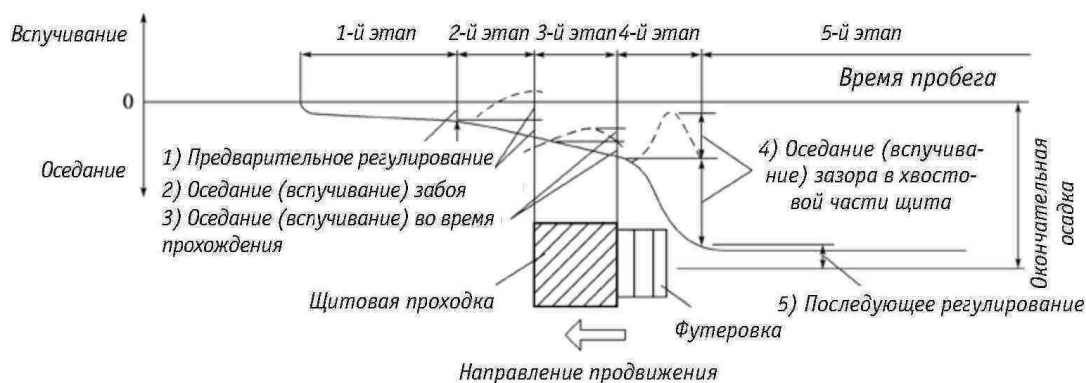
*Рис. 3-15. Наклон здания*



*Рис. 3-16. Растрескивание грунта*

### **3.3.1. Механизм нарушения почвы при щитовой выемке грунта**

По мере продвижения щита, оседание или поднятие фундамента происходит накладываясь друг на друга, процесс показан на *рис. 3-17* и наконец достигает своего конечного значения. Где стадии 1 и 2 находятся до прохождения щита, стадия 3 – во время прохождения щита, а стадии 4 и 5 – это явления, происходящие после прохождения щита. Эти явления не являются неизбежными, и при условии, что схема туннелирования щита и параметры выбраны соответствующим образом, продольная деформация фундамента может быть сведена к минимуму. Краткое описание причин и механизмов оседания на каждом этапе приведено в *таблице 3-5*.



*Рис. 3-17. Схема стадий деформации фундамента во время продвижения щита*

#### *1) Упреждающее регулирование*

Предэкскаваторная осадка – это осадка, возникающая с момента, когда забой находится на значительном расстоянии (десятки метров) от точки наблюдения за грунтом до момента, когда забой достигает точки наблюдения и понижения уровня грунтовых вод по мере выемки щита. Расстояние, на которое влияет предварительное оседание, варьируется в зависимости от мягкости грунта.

#### *2) Оседание или поднятие перед выемкой грунта*

Предэкскаваторная осадка – это осадка, возникающая с момента, когда забой котлована находится на расстоянии нескольких метров от точки наблюдения, до момента, когда забой котлована находится непосредственно под точкой наблюдения. Когда давление в камере щита меньше фронтального давления, при выемке щита образуются стратиграфические потери и грунт над щитом оседает, и наоборот, когда давление в камере выше фронтального давления, грунт над щитом поднимается и опускается.

#### *3) Оседание грунта во время прохождения щита*

Оседание в период с момента, когда поверхность забоя достигает уровня непосредственно ниже точки наблюдения, до момента, когда конец щита проходит точку наблюдения, происходит в основном из-за нарушения почвы и снятия напряжения в почве, вызванного разницей между диаметром бурения щита и диаметром щита.

#### *4) Осадка пустот в хвостовой части щита*

Оседание, которое происходит после того, как хвост щита проходит непосредственно под точкой наблюдения. Это упругопластическая деформация, вызванная высвобождением напряжений грунта в пустотах хвостовой части щита. Величина оседания тесно связана с одновременным давлением цементации и скоростью заполнения шламом торца щита, которая меньше при более удовлетворительном заполнении, и наоборот.

#### *5) Поздняя осадка грунта*

*Таблица 3-5. Причины и механизмы деформации, вызванные щитовой конструкцией*

| Тип просадки                                    | Основные причины возникновения                                                                                       | Концентрация напряжений                                                                 | Механизм деформации           |
|-------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------|
| Упреждающее регулирование                       | Снижение уровня грунтовых вод                                                                                        | Снижение давления поровой воды и увеличение эффективного напряжения в окружающей породе | Сжатие и уплотнение, просадка |
| Первое оседание или подъем забоя щитовой выемки | Давление на рабочую поверхность: повышается, если оно слишком большое, оседает, если слишком маленькое               | Окружающая порода снимает напряжение, нарушенное нагрузкой давления грунта              | Упругопластическая деформация |
| Оседание во время прохождения щита              | Нарушение строительных работ, сдвиговое смещение между щитом и окружающей породой (почвой), выброс шлака             | Вихревое течение                                                                        | Сжатие                        |
| Урегулирование пустот в хвостовой части щита    | Потеря опоры в окружающей породе (почве), несвоевременная цементация за тьюбингом                                    | Снятие напряжения                                                                       | Упругопластическая деформация |
| Поздняя осадка                                  | Структурная деформация, нарушение стратиграфии, падение давления воды, циркулирующей в пустотах горных пород и т. д. | Уплотнение почвы                                                                        | Сжатие и ползучая просадка    |

### 3.3.2. Факторы, влияющие на деформацию и оседание грунта

#### 1) Свойства раскопанного пласта

##### (1) Глубина туннеля

Влияние глубины туннеля на стратиграфическое смещение варьируется в зависимости от стратиграфических условий, и Аттвелл вывел следующую зависимость:

$$\frac{i}{R} = k \left( \frac{h}{2R} \right)^2$$

(3-43),

где: R – радиус туннеля (м);

h – глубина заложения туннеля (м);

i – расстояние от оси туннеля до точки инверсии кривой опускания грунта (м);

k, n – константы, связанные с характеристиками грунта и строительными факторами.

##### (2) Верхняя часть нагрузки

Вертикальное давление над туннелем оказывает значительное влияние на оседание грунта. Broms & Bennermark предлагает выразить легкость строительства туннеля и степень

смещения грунта в терминах коэффициента устойчивости  $N_s$ . В пластичных глинистых грунтах, когда глубина туннеля не меньше удвоенного диаметра туннеля, то есть  $z \geq 2r$ .

$N_s$  будет менее 6, когда строительство туннеля не будет очень сложным. В щитовой конструкции, чем выше значение  $N_s$ , тем выше вероятность проникновения глины в хвостовой зазор щита. Когда  $N_s$  приближается к 7, щит становится трудно контролировать. Когда опорное давление высокое, оно часто вызывает поднятие поверхности и увеличивает просадку в дальнейшем, поэтому коэффициент устойчивости должен контролироваться в определенном диапазоне в соответствии с грунтовыми условиями.  $N_s$  определяется по следующей формуле:

$$N_s = \frac{\sigma_z - \sigma_r}{c_u}$$

(3-44),

где:  $\sigma_z$  – общее вертикальное давление в центре туннеля на глубине заглубления;  
 $\sigma_r$  – опорное давление туннеля (включая давление воздуха);  
 $c_u$  – прочность грунта на сдвиг без деформации.

#### (3) Свойства почвы

Такие свойства, как сжимаемость и прочность грунта, также оказывают важное влияние на смещение грунта.

#### (4) Влияние характеристик щита

Несбалансированное давление воды и грунта на забой, снижение режущей способности и тяги приведут к обрушению забоя и чрезмерной выемке грунта, отклонения в проходке туннеля приведут к увеличению прицепных пустот, а чрезмерный крутящий момент резания и тяга щита на забое вызовут нарушение грунта.

#### (5) Влияние качества обратной засыпки цементирования и эксплуатационного качества

На смещение грунта влияют целесообразность и своевременность цементации обратной засыпки, качество сборки тубингов, умеренность давления грунта, хорошее управление положением при продвижении щита, наличие отклонений и рывков, разумность процедуры строительства, квалификация и опыт строительного персонала и т. д.

#### 2) Свойства грунтов при проходке туннелей

Источниками осадок грунта при щитовой проходке являются: изменение состояния грунта вследствие продвижения щита, упругопластические деформации грунта из-за вибраций в туннеле или величины среза при наклоне ротора. Далее приводится краткое описание причин осадок грунта:

(1) Движение грунта на поверхности забоя. Под воздействием щита напряжение грунта меняется, что приводит к движению грунта, особенно на поверхности забоя. Во время проходки горизонтальное опорное напряжение, оказываемое на грунтовые массы забоя, больше или меньше исходного бокового давления, поэтому грунт над передней частью забоя может оседать вниз или вспучиваться вверх.

(2) Нарушение структуры пласта приводит к движению грунта. К причинам нарушения структуры пласта относятся зазоры между зданиями, избыточная или недостаточная экскавация или другие причины потери грунта, а именно:

1. Сдавливание грунта перед щитом.

2. Свободные зазоры в грунте из-за разницы диаметров щитового корпуса и смонтированного тубинга.

3. Изменение уклона щита приводит к избыточной экскавации. Например, изменение уклона щита меняет направление движения проходческого щита, что приводит к восходящему или нисходящему уклону, избыточной экскавации и увеличению зазора в хвостовой части щита.

4. Потеря грунта в связи с кривизной проходки.

5. Избыточная экскавация выступами ножевого кольца в процессе проходки.

6. Вдавливание грунта в зазор хвостовой части щита. После выхода тубинга из хвостовой части щита между стеной забоя и внешним краем тубинга образуется зазор. В случае несвоевременного нагнетания тампонажного раствора, недостаточного количества раствора или давления нагнетания окружающий грунт теряет равновесие в трех измерениях и смещается в данный зазор, что приводит к проседанию грунта. В неустойчивых водоносных породах это является наиболее распространенной причиной просадки грунта. Когда слой глины приклеивается к внешней оболочке щита, зазор между тубингом и грунтом значительно увеличивается. Если не увеличить количество тампонажного раствора, то это неизбежно приведет к усилению просадки грунта.

(3) Просадки грунта происходят по причине того, что из-за продвижения щита давление воды в порах грунта изменяется или уровень грунтовой воды снижается из-за уменьшения количества атмосферных осадков.

(4) Деформация тубинга, вторичная консолидация и изменение состояния грунта (особенно в мягких водонасыщенных грунтах).

Под воздействием давления окружающего грунта тубинг деформируется, при этом тубинг воздействует на окружающий грунт в противоположном направлении. Деформация грунта – комплексное проявление взаимодействия грунта и тубинга. Из-за строительных факторов, таких как трамбование грунта во время продвижения щита и залив тампонажным раствором хвостовой оболочки щита, в окружающем пласте образуется зона избыточного порового давления воды. Затем избыточное поровое давление рассеивается и становится нормальным, во время этого процесса происходит выжимание воды или сближение грунтовых частиц, что приводит к осадкам грунта (консолидации грунта). После первичной консолидации грунта он снова подвергается длительному компрессионному сжатию. Уплотнение продолжается в результате ползучести твердых частиц грунта, что называется вторичной консолидацией грунта. В мягких пластичных и текучих грунтах с большим коэффициентом пористости и высокими показателями чувствительности вторичная консолидация часто длится несколько лет, а коэффициент вторичной консолидации может достигать 35%.

(5) Движение щита назад.

Когда процесс проходки останавливается, домкрат из-за утечки масла может вернуться в свое первоначальное положение, в результате чего щит может откатиться назад, приводя к осадкам или разрыхлению грунта в месте забоя.

(6) Обделка туннеля может привести к большой осадке грунта. Кроме того, если в обделке туннеля есть течь и вода попадает на мягкий грунт, это вызовет его оседание.

(7) Изменение направления движения щитовой проходки.

Если щит движется неровно, меняется уклон щита, щит поднимается или опускается, то фактический участок выемки представляет собой не круг, а эллипс, что приводит к осадке грунта. Чем больше угол отклонения между осью щита и осью туннеля, тем больше степень разрыхления и перебора грунта и, как следствие, осадки грунта.

*3) Свойства глинистых растворов*

Основной метод поддержания стабильности забоя при помощи глинистого раствора заключается в том, что глинистый раствор проникает в пласт под действием осмотического

давления, в результате чего происходит колюматация пор пласта твердыми частицами глинистого раствора и образуется гидрофобная пленка. Гидрофобная пленка создает избыточное давление и тем самым удерживает частицы грунта на поверхности стенок туннеля. В процессе продвижения проходческого щита пленка проходит следующий цикл: «образование – затвердевание – разрушение – образование». Таким образом, стандарт для оценки качества глинистого раствора с точки зрения уменьшения осадок грунта таков: количество глины, просочившейся в пласт, должно быть низким, а толщина гидрофобной пленки и скорость ее образования должны обеспечивать постоянную стабильность забоя перед исполнительным органом щита во время проходки туннеля.

Из-за того, что диаметр ротора немного больше диаметра корпуса щита, между корпусом щита и грунтом может появляться свободный зазор. Этот зазор заполняется глиной и частью осевшего грунта. Если возможно увеличить текучесть этой части грунта и уменьшить трение и давление головки щита на окружающий пласт, то осадки грунта уменьшатся.

#### 4) Давление синхронного цементирования

Степень компенсации вспучивания поверхности земли  $\Delta s$  при прохождении хвостовой части щита является функцией, которая определяется толщиной земляного покрова, геологическими параметрами, наружным диаметром тубингов  $D_2$  и коэффициентом избыточного давления синхронного цементирования  $\Delta P/P_{стат}$ . Зависимость между давлением синхронного цементирования и оседанием поверхности земли получается на основе выводов формулы Пика (Pesk):

$$\Delta_s = \frac{V}{\sqrt{2\pi i}}$$

(3-45a),

$$V = \frac{\pi}{4} (D_y^2 - D_2^2)$$

(3-45b),

$$D_y = \left( 1 + \frac{m\Delta P}{P_{стат}} \right) D_2$$

(3-45c),

где:  $D_y$  – эквивалентный радиус избыточного давления;

$m$  – коэффициент коррекции избыточного давления.

#### *5) Прочие параметры проведения работ*

Толкающее усилие резцовой головки является одним из важных факторов поддержания стабильности забоя, поэтому выбор правильной величины этого усилия является сложной задачей. Как правило, в процессе строительства установка давления разреза не принимается во внимание, а служат лишь в качестве предохранительных запасов. На самом деле, в процессе проходки туннеля не следует пренебрегать значением резцовой головки относительно поддержки забоя. То, как резцовая головка выполняет функцию поддержания устойчивости забоя, играет важную роль в уменьшении возмущения массива грунта.

Что касается скорости продвижения, то степень возмущения грунтовых масс в процессе проходки будет увеличиваться в зависимости от времени прохождения. Оседание поверхности земли, вариации состава почвы создают определенное отставание, поэтому увеличивая скорость проходки, можно уменьшить степень возмущения на массив грунта.

### **3.3.3. Способы прогнозирования смещения пластов**

Способы прогнозирования смещения пластов, в основном, включают в себя эмпирические формулы, цифровое моделирование, испытания модели, экспертные системы и теории серых систем (серый реляционный анализ). Среди них экспертные системы и теории серых систем – это самый горячо обсуждаемый предмет исследований в последние годы, который представляет собой новый ход мыслей на прогнозирование деформаций, но имеет свои сложности в виде огромного количества факторов, которые необходимо учитывать, а также сложности моделирования и трудностей применения в инженерии. Способ испытания модели, в свою очередь, характеризуется высокой стоимостью и плохой управляемостью. Модель метода эмпирической оценки, основанная на статистическом анализе данных из фактических измерений, характеризуется простотой и практичностью, помогает на стадии проектирования с большой долей достоверности оценить степень возможной деформации и имеет хорошую эффективность руководства строительством. Способ цифрового моделирования также является одним из высокоэффективных методов и занимает важное место в изучении закономерностей смещения горизонта в пластах проходки туннелей.

#### *1) Эмпирическая формула*

Способ эмпирического прогнозирования, в основном, осуществляется посредством наблюдения за оседанием поверхности земли, данные наблюдения подвергаются математической обработке, а затем в математической форме применяются относительно закономерности оседания, на основании этого, делаются теоретические и эмпирические выводы о максимальной степени просадки поверхности и ее распределении. В практике строительства применяется формула Реск и серия корректирующих формул Пика. Реск предположил, что оседание земли в процессе работ происходит в недренируемых условиях, поэтому объем впадины оседания равен объему потери пласта. Потеря пласта распределяется равномерно по длине туннеля. Поперечное распределение оседания поверхности земли аналогично кривой нормального распределения, как показано на *рис. 3-18*.

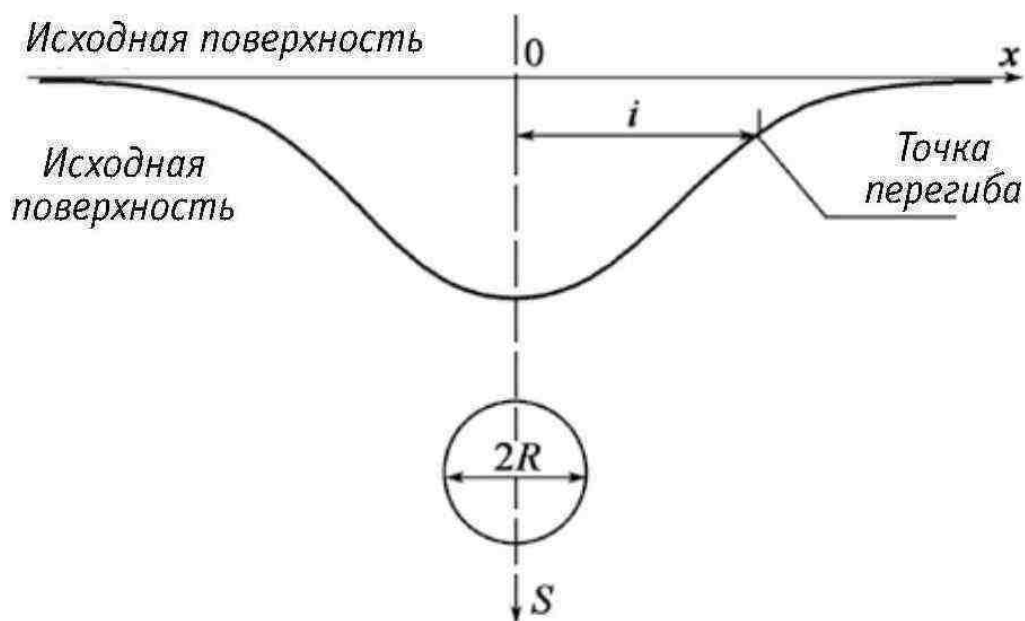


Рис. 3-18. Форма впадины оседания верхнего грунта над туннелем – кривая нормального распределения

$$S(x) = S_{\max} \cdot \exp \left( -\frac{x^2}{2 \cdot i^2} \right)$$

(3-46a),

$$S_{\max} = \frac{V_s}{\sqrt{2\pi} \cdot i} \approx \frac{V_s}{2.5 \cdot i}$$

(3-46a),

где:  $S(x)$  – длина оседания поверхности земли в области центральной линии туннеля;  
 $S_{\max}$  – степень просадки поверхности земли относительно центральной оси туннеля;  
 $x$  – расстояние от центра оси до края впадины оседания;  
 $i$  – коэффициент ширины впадины оседания.  
 $V_s$  – степень потери пласта при проходке 1м туннеля.

$$i = \frac{z}{\sqrt{2\pi} \cdot \operatorname{tg} \left( 45 - \frac{\varphi}{2} \right)}$$

(3-47),

где:  $z$  – расстояние от центра забоя до поверхности земли;  $\varphi$  – угол внутреннего трения окружающих пластов, ширина впадины оседания поверхности земли  $B \approx 2.5i$ .

Аттвелл внес корректировки в коэффициент ширины  $i$ , предложил коэффициент ширины впадины поперечного оседания  $i$ , зависящий от прочности пласта вблизи поверхности земли, глубины залегания туннеля и радиуса туннеля, что можно приближенно записать как:

$$\frac{i}{R} = K \cdot \left( \frac{z}{2R} \right)^n$$

(3-48),

$$\delta_{\max} = \frac{V}{\sqrt{2A} \cdot i}$$

(3-49),

где:  $z$  – расстояние от центра забоя до поверхности земли;

$R$  – внешний радиус щита;

$A$  – поперечное сечение туннеля;

$K, n$  – испытательный коэффициент;

$V$  – объем впадины оседания;

$\delta_{\max}$  – степень оседания поверхности земли по центральной линии туннеля.

Английские ученые Клаф и Шмидт в 1974 году предложили следующую расчетную формулу коэффициента ширины впадины оседания поверхности в условиях насыщенной глинистой гидропластичности:

$$\frac{i}{R} = \left( \frac{z}{2R} \right)^{0.8}$$

(3-50),

где:  $z$  – глубина от поверхности земли до центра туннеля;

$R$  – радиус туннеля.

О’Рейли-Нью провел анализ максимальных значений просадки, объема впадины оседания и фактических значений точки перегиба для 11 из 19 объектов в условиях вязких слоев и для 6 из 16 объектов в условиях песчаного грунта и грунта обратной засыпки в Англии, на основании чего выдвинул гипотезу о том, что форма впадины оседания представляет собой кривую нормального распределения, и предположил, что для вязких слоев подходит следующая формула:

$$i = k \cdot z$$

(3-51),

$$\delta_{max} = \frac{V_s}{\sqrt{2\pi i}}$$

(3-52)

где: для  $k$  в твердом глинистом грунте берется 0.4, в мягком глинистом грунте берется 0.7, а в глинистом грунте средней твердости и мягкости берется 0.5. В дополнение к этому, с помощью статистического метода также вывел формулу вычисления степени максимального горизонтального оседания;

для песчанистых грунтов:

$$S_{max} = 1.032 \exp \left( \frac{7.8655}{z/2R} \right)$$

(3-53),

для вязких грунтов:

$$S_{max} = 29.086 - \frac{12.173}{\ln\left(\frac{z}{2R}\right)} + 7.4233 \cdot N^{1.1553}$$

(3-54),

формула для вычисления диапазона влияния оседания:

$$\omega = 1.5 \cdot R \cdot k \cdot \left(\frac{z}{2R}\right)^n$$

(3-55),

где: в значениях  $k$  и  $n$  – при использовании щита с грунтопригрузом, для вязкого грунта:  $k = 1.3$ ,  $n = 0.70$ ; для песчанистого грунта:  $k = 0.65$ ,  $n = 1.2$ .

### 2) Цифровое моделирование

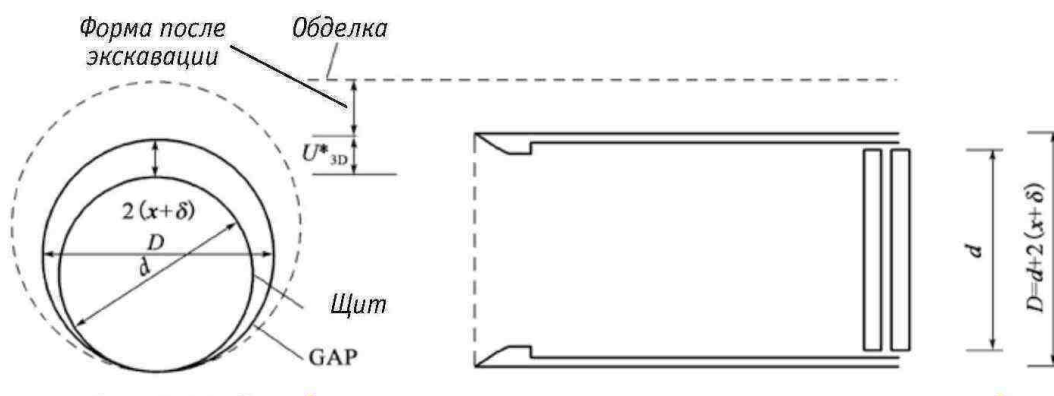
Способ цифрового моделирования – это еще один важный метод прогнозирования оседания поверхности земли. Хотя параметры технологического уровня невозможно точно определить до начала строительства, однако, влияние определенных изменений этих параметров на смещение поверхности земли и грунтовых слоев вокруг туннеля поддается оценке. С помощью моделирования анизотропии почвы и внутренней пластичности грунта возможно получить рациональные значения распределения оседания, также возможно осуществлять прогнозирование горизонтального и вертикального распределения смещения грунта на ключевых участках туннельного строительства. Среди часто применяемых техник цифрового моделирования существуют: метод конечных элементов, метод граничных элементов и другие методы, покрывающие сферы двумерной плоской деформации, трехмерной упругопластичности и т. д.

### 3) Испытание на модель

В соответствующих условиях, моделирование производственных работ с помощью испытания моделей для определения закономерностей изменения смещения грунтовых масс и рабочих параметров, а также определения соответствующих требований и мероприятий технического контроля – это эффективное средство для снижения строительных рисков и обеспечения безопасности. В настоящее время испытания модели для щитопроходных работ подразделяются на два типа: испытание модели центробежного поля и испытание модели гравитационного поля. Испытание центробежной модели характеризуется точностью коэффициента подобия и высокой степенью соответствия действительности, но технология испытаний сложна. При испытании гравитационной модели, показатели параметров, особенно коэффициент подо-

бия, не могут быть установлены и воссозданы с полной точностью, однако, в практических условиях удастся гарантировать рациональность и достоверность подобия получаемых параметров, также удастся достигать достаточно хороших результатов испытаний и их цели, при этом технология испытаний достаточно проста и процессы легко контролировать. Принимая во внимание реальные и экспериментальные условия, для прогнозирования обычно применяется испытание модели гравитационного поля.

В работах Lee Andrew (1982), Roweetal (1983) был предложен метод прогнозирования оседания поверхности земли и разнотлубинных грунтовых слоев. Было введено понятие о параметре потери пласта GAP (параметр суммарного зазора) для прогнозирования оседания недренированных насыщенных глинистых грунтов. Под GAP подразумевается количество избыточно выкопанных грунтов масс, превышающее внешний диаметр сегментов туннеля, которое включает в себя потерю избыточно выкопанного грунта под действием силы трехмерного движения в отношении поверхности забоя и потерю грунта под воздействием факторов проведения работ. Размер зазора GAP равен расстоянию от свода произведенной щитом выемки до верхушки тубинговой обделки туннеля, как показано на *рис. 3-19*.



*Рис. 3-19. Определение параметра потери грунта после проходки GAP*

По определению Lee:

$$GAP = G_p + U_{3D}^* + \omega$$

(3-56),

где:  $G_p$  – геометрический просвет между внешним диаметром щита и внешним диаметром тубинга, сформированный толщиной хвостовой части щита  $\delta$  и хвостовым зазором  $x$ ;

$$G_p = D - d = a(x + \delta)$$

(3-57),

где:  $D$  – внешний диаметр щита;

$d$  – внешний диаметр тубинга.

Хвостовой зазор  $x$  подстраивается под осуществление горизонтальной и вертикальной корректировки при отклонении щита от проектной осевой линии, подстраивается под осуществление работ по сборке тубингов. Выборочное значение  $x$  составляет примерно 25 ~ 60 мм. Значение  $G_P$  можно определить сразу после того, как щит и тубинг были выбраны.

$U \cdot 3D$  – это эквивалент трехмерного радиального смещения, вызванного продвижением забоя. Он указывает превышение объема выемки грунта при обрушении на забой грунтовых масс, вследствие трехмерной деформации, вызванной сбросом напряжения в забое;

$\omega$  – указывает потерю грунта, вызванную факторами проведения работ (включая выправление отклонения щита, уклон вверх, уклон вниз, отход назад и т. д.). Формула расчета значения  $\omega$  следующая:

$$\omega = L \cdot a$$

(3-58),

где:  $L$  – длина щита;

$a$  – угол подъема при уклоне щита вверх.

Причина потери грунтовых слоев вследствие проходки щита является многофакторной. В таблице 3-6 перечислены формулы прогнозирования и соответствующие выборные значения  $GAP$  для потерь грунтовых слоев всех видов в условиях вязкого грунта.

*Таблица 3-6. Факторы, которые необходимо учитывать при расчете  $GAP$  (применительно к вязким слоям)*

| Фактор потери пласта                                    |                     | Максимальное значение потери пласта в пределах единичной длины туннеля | Коэффициент потери пласта | Соответствующее выборное значение GAP |
|---------------------------------------------------------|---------------------|------------------------------------------------------------------------|---------------------------|---------------------------------------|
| Потеря пласта в забое                                   |                     | $\pi R^2 h$                                                            | 0 ~ 0.2%                  | R h                                   |
| Потеря пласта при избыточной выемке во время разрезания |                     | $2_{\pi} R$                                                            | 0.1% ~ 0.5%               | 2 t                                   |
| Потеря пласта вдоль корпуса щита                        |                     | $0.1_{\pi} R^2$                                                        | 0.1%                      | 0.1R                                  |
| Потеря пласта в хвостовой части щита                    | Над уровнем гр. вод | $2_{\pi} R (R - R_1)$                                                  | 0% ~ 4%                   | 2 (R - R <sub>1</sub> )               |
|                                                         | Под уровнем гр. вод | $_{\pi} R (R - R_1)$                                                   | 0% ~ 2%                   | R - R <sub>1</sub>                    |
| Потеря пласта при выравнивании уклона                   |                     | $_{\pi} R \cdot L \cdot \alpha$                                        | 0.2% ~ 2%                 | L · α                                 |
| Потеря пласта при продвижении по кривой                 |                     | $L^2 R / [8 (R + R_c)]$                                                | 0.3% ~ 1%                 | $L^2 R / [8 (R + R_c)]$               |
| Потеря пласта, вызванная фронтальным препятствием       |                     | A                                                                      | 0 ~ 0.5%                  | A / ( $_{\pi} R$ )                    |

Примечание: R – внешний радиус щита, R<sub>1</sub> – внешний радиус тубинга, t – количество избыточной проходки, L – длина щита, α – угол подъема, RC – горизонтальное смещение грунтовых масс забоя назад во время продвижения щита на единичную длину, h – радиус кривой продвижения щита, A – объем фронтального препятствия перед щитом, V% = значение потери пласта / (πR<sup>2</sup>).

Фактическое выборное значение U\*3D и ω различается для разных методов щитовой проходки и разных проектных условий. В таблице 3-6, где с помощью комбинаций различных значений потери пласта подразделяются на различные модели, при отличающихся моделях потери пласта, способы расчета GAP также будут отличаться. Использование технологии синхронного цементирования в рабочем процессе сдерживает увеличение потерь пласта, поэтому при определении модели потери пласта необходимо включить в расчеты влияние коэффициента цементирования (n%). Коэффициент цементирования – это отношение размера фактического зазора, заполняемого бетонирующей суспензией, к количеству теоретической потери пласта. *Модель 1:* используется в условиях, при которых щит обладает хорошими механическими характеристиками, персонал обладает достаточным опытом, продвижение щита по прямой происходит в обычном режиме. При этом выправление отклонения щита, уклон вверх и уклон вниз, являются малыми, значит избыточная выемка, вызванная этими действиями, отдельно не учитывается; при обычном зигзагообразном продвижении щита вперед, значение потери пласта в этой части ω 1 рассчитывается с помощью количества избыточной выемки при ее срезе; при условии сохранения баланса между давлением грунта в герметичном призабойном отсеке и давлением грунта с жидким шламом в забое, значение U\*3D, определяемое потерей грунта в забое, будет равно нулю; не учитывается потеря пласта вокруг корпуса щита; учитывается влияние Gr; учитывается синхронное цементование. Параметры потери окружающих обделку пластов следующие:

$$GAP = (1 - n\%) \cdot (G_p + \omega_1)$$

(3-59),

Параметры потери пласта вокруг корпуса щита:

$$GAP = (1 - n\%) \cdot \omega_1$$

(3-60),

*Модель 2:* используется при нахождении щита в особых грунтовых слоях и в особых проектных условиях. Например, при верхнем уклоне щита во время продвижения в условиях песчаных грунтов, либо поверхностного земляного покрова на малой глубине, либо при нерациональной установке толкающих усилия домкратов щита после завершения проходки щита (финального пробития) и отклонении от осевой линии, либо при продвижении щита по кривой. Учитывается потеря пласта избыточной проходки резцовой головки и вокруг корпуса щита, также учитывается потеря пласта  $U \cdot 3D$  вследствие трехмерного движения грунтовых масс забоя, таким образом, параметры потери пласта вокруг обделки следующие:

$$GAP = (1 - n\%) \cdot (GP + \omega_2 + U_{3D}^*)$$

(3-61),

Параметры потери пласта вокруг корпуса щита:

$$GAP = (1 - n\%) \cdot (\omega_2 + U_{3D}^*)$$

(3-62),

*Модель 3:* в основном используется при потере стабильности забоя в процессе продвижения щита. При нормальном продвижении щита вперед, трехмерная деформация грунта забоя обычно очень мала. Однако, в случае движения щита назад, либо в случае обвала забоя в результате затопления, вызванные этим потери пласта достаточно существенные. В таком случае предполагается, что забой считается свободным, изначальное напряжение грунта забоя полностью сброшено, тогда максимальное значение потери пласта забоя равно  $(U \cdot 3D)_{\max}$ , в этом случае параметры потери пласта следующие:

$$GAP = (1 - n\%) \cdot [G_p + (U_{3D}^*)_{max}]$$

(3-63),

Параметры потери пласта вокруг корпуса щита:

$$GAP = (1 - n\%) \cdot (U_{3D}^*)_{max}$$

(3-64),

#### 4) Экспертная система и теория серого в прогнозировании смещения пласта

Хотя эмпирический метод и цифровой способ стали двумя главными методами прогнозирования пласта в туннельной проходке, с ними сопряжено множество сложностей. Если при использовании эмпирической формулы встречается большой разброс ограничивающих факторов, например, геометрическая форма, условия пласта, способ строительства, качество строительства и т. д., то экспертный метод предлагает новый путь решения. Опыт проведения работ и результатов исследований резюмируется, экстрагируется в систематизированные эмпирические правила, попадает в базу знаний экспертной системы, с помощью вычислительного оборудования моделируется в экспертное логическое заключение, что помогает не только избежать многих затруднений, с которыми сталкивается точная наука, но и сделать результаты прогнозов более применимыми. На основе обобщения результатов исследований за более чем 20 лет Университет Тунцзи выдвинул концепт использования экспертной системы для прогнозирования оседания туннелей, создав в 1990 году прототип экспертной системы для прогнозирования оседания поверхности земли, который был применен в мониторинге строительства первой линии Шанхайского метрополитена и показал достаточно хорошие результаты.

#### 3.3.4. Контроль оседания и деформации поверхности земли

Размер деформации поверхности земли зависит от условий пластов и грунтовых вод, диаметра туннеля, глубины проходки, условий проведения работ и т. д. Выбор подходящих параметров проходки и вспомогательных работ имеет важное значение для контроля оседания и деформации поверхности земли.

##### 1) Предварительный контроль перед проведением проходческих работ.

Перед началом проведения щитопроходных работ, прежде всего, необходимо произвести геологическую разведку всего туннельного пути, затем, на основании различных геологических условий, выбрать нужный тип щита и способы проведения вспомогательных работ. При выборе щита, кроме таких факторов как геологические условия пласта в районе строительства, состояние поверхности земли вдоль туннеля, длина туннеля, форма сечения туннеля, сроки строительства, условия эксплуатации и т. д., следует также тщательно изучить вопросы, связанные с проведением проходки, обделки, чтобы работы с применением выбранного типа щита были произведены безопасно и экономично.

Кроме этого, с целью уменьшения деформации фундаментов, перед продвижением щита, следует произвести прогнозирование на основании предыдущего строительного опыта, метода

конечных элементов и прочих методов, на основании результатов этого прогноза установить основные значения опорных величин. Вместе с этим, во время продвижения над центральной осью туннеля, а также в пределах обеих сторон необходимо установить контрольные точки для осуществления нивелировки, руководствуясь результатами наблюдений производить работы, корректировать параметры, суммировать опыт и использовать данные при управлении работами на последующих участках.

2) Контролируя параметры проходки во время продвижения щита, необходимо минимизировать объемы избыточной проходки и воздействие на окружающие пласты, посредством оптимизации и сочетания параметров проходки достигать максимально выгодных условий продвижения щита, таким образом добиваясь минимального нарушения окружающего грунта, малых потерь пласта, минимального давления поровых вод, а также наилучшего контроля оседания и вспучивания поверхности земли, высокой скорости продвижения щита и высокого качества монтажа тюбингов.

На этапах проходки при строительстве, на основании процесса и характеристики строительства туннеля щитовой проходкой, основные причины деформации поверхности земли вследствие щитовой проходки можно резюмировать следующим образом:

(1) Движение грунтовых масс забоя. Во время проходки туннеля, когда горизонтальное опорное напряжение, оказываемое на грунтовые массы забоя, больше, либо меньше исходного латерального (бокового) давления, грунт над передней частью забоя может оседать вниз, либо вспучиваться вверх.

(2) Грунт экструдирован в хвостовой зазор щита. После покидания тюбингов хвостовой частью щита, между стенкой шахты и внешней стороной тюбинга образуется кольцо зазора, в которое смещается грунт, тем самым вызывая оседание поверхности земли.

(3) Взаимодействие между грунтовой массой и тюбингом воздействуют друг на друга. Под воздействием давления окружающего грунта тюбинг деформируется, при этом тюбинг воздействует на окружающий пласт в противоположном направлении. Деформация пласта – комплексное проявление взаимодействия грунтовой массы и тюбинга.

(4) Изменение направления продвижения. При осуществлении уклона щита вверх, либо вниз, происходит экскавация избыточной массы грунта и хвостовой зазор щита увеличивается.

(5) Вторичная консолидация возмущаемого грунтовой массой – это еще одна важная причина деформации, особенно в насыщенных пластах мягкого грунта.

Таким образом, контролируя оседание и деформацию поверхности земли в процессе проведения проходческих работ, следует обращать особое внимание на следующие мероприятия.

#### 1) Контроль параметров проходки

Продвижение щита вперед происходит, прежде всего, посредством управления параметрами толкающего действия гидроцилиндров. В процессе продвижения щита вперед преодолевается сопротивление фронтальной массы, сила трения между корпусом щита и грунтовой массой, между хвостовой частью щита и тюбингами, между прицепным послещитовым комплектом и стальными рельсами. Общее толкающее усилие щита должно превышать сумму фронтального толкающего усилия и общей силы трения, но слишком большое толкающее усилие может привести к сжатию фронтальной грунтовой массы, при этом слишком малая тяга негативно влияет на скорость продвижения щита. Как правило, общее толкающее усилие щита должно соответствовать следующему соотношению: Активное давление фронтальной грунтовой массы + давление воды + общая сила трения < общее толкающее усилие щита < пассивное давление фронтальной грунтовой массы + давление воды + общая сила трения.

Во время продвижения щита, следует контролировать скорость продвижения, не давая щиту двигаться назад. Скорость продвижения определяется толкающим усилием гидроцилиндров и количеством входящего и выходящего грунта. Слишком большая, либо слишком малая скорость одинаково негативно сказываются на контроле положения щита. Слишком большая

скорость может привести к излишнему «всплытию», щита, слишком малая – к излишнему погружению. Во время монтажа тубингов, при сжатии гидроцилиндров продвижения может возникать движение щита назад, что, в свою очередь, вследствие потерь пласта, неизбежно приведет к оседанию грунтовой массы над забоем.

При проходке щита с грунтопригрузом (либо гидропригрузом), необходимо произвести оптимальные установки относительно давления грунта (либо глинистой воды) в призабойном отсеке, чтобы соотношение давления грунта (глинистой воды) в герметичном призабойном отсеке и водно-грунтового давления в забое находилось в примерно уравновешенном балансе. Это ключевой параметр сохранения стабильности забоя и основное техническое звено для щитовой проходки с грунтопригрузом, либо гидропригрузом.

#### 2) Контроль положения и выравнивания отклонений

Положение щита включает в себя три параметра: уклон продвижения, направление плоскости и собственный угол поворота. Факторы, влияющие на положение щита: количество выпускаемого грунта, толщина грунтового покрова, условия цементирования вокруг корпуса щита во время продвижения, условия распределения пласта грунта в забое, условия распределения усилия гидроцилиндров продвижения. Например, при продвижении в условиях песчаных слоев, либо малой толщины грунтового покрова, может происходить излишнее «всплытие» щита. Способы решения, в основном, заключаются в регулировке рационального положения гидроцилиндров продвижения.

Траектория продвижения щита вперед, как правило, является зигзагообразной. Необходимо обеспечить прохождение щита по заданной проектной кривой, в процессе продвижения вперед, посредством своевременного контроля производить корректировку отклонения. Данная корректировка не должна быть слишком большой, чрезмерное исправление отклонения может привести к излишней проходке и повлиять на стабильность окружающей грунтовой массы, поэтому необходимо делать небольшие корректировки, постоянно производя мониторинг.

#### 3) Контроль давления в призабойном отсеке

В процессе щитовой проходки, сохранение баланса между давлением в призабойном отсеке и давлением поверхности работ (сумма давлений грунта и водно-глинистого раствора) является крайне важным фактором предупреждения оседания поверхности земли и сохранения безопасности строений. Значение давления в призабойном отсеке  $P$  должно быть противопоставлено давлению грунтовых пластов и гидростатическому давлению. Сумма давления гидростатического давления в центре резцовой головки и давления грунта равна  $P_0$ , то  $P = K \times P_0$ . Для вязкостных грунтов в значение  $K$ , как правило, берется 1.0, при этом по фактической ситуации производятся корректировки с желательной градацией в 0.005 МПа. Для песчаных грунтов в значение  $K$ , как правило, берется 1.3, при этом желательная градируемая корректировка составляет 0.01 МПа. Корректировки давления в призабойном отсеке  $P$  в процессе проходки осуществляются на основании информации мониторинга геологических условий, глубины прохождения и оседания поверхности земли, посредством сохранения баланса между объемом выемки грунта и объемом выведенного грунта, что достигается установками и корректировкой скорости проходки и объема выводимого грунта.

#### 4) Контроль количества выпускаемого шлака

В процессе щитовой проходки объем выемки грунта зависит от скорости вращения резцовой головки, крутящего момента разрезания и толкающего усилия гидроцилиндров продвижения. Объем отводимого грунта, в свою очередь, регулируется скоростью вращения шнекового транспортера (либо расхода шламового насоса). Так как щиты с грунтопригрузом и гидропригрузом используют давление грунта для уравнивания давления грунта / шлама забоя, чтобы колебание давления в призабойном отсеке, либо давления шлама оставалось на малых величинах, необходимо сохранять баланс между объемом выемки грунта и объемом

отводимого грунта. Объем отводимого шлака должно соответствовать объему проходки таким образом, чтобы значение опорного давления было стабильным и рациональным, тем самым обеспечивались наилучшие условия работы щита.

#### 5) Контроль цементирования

По мере продвижения щита между корпусом щита и внешним периметром тубинга образуется технологический зазор. Полное и одновременное заполнение этого зазора – это ключевое звено в уменьшении оседания поверхности земли. При определении параметра давления цементирования следует избегать чрезмерно большого давления, которое может привести к вспучиванию поверхности земли, либо повреждению тубинговой обделки и повреждению хвостовой части щита. Теоретически давление цементирования должно быть чуть выше давления грунта и воды.

Для получения ожидаемого эффекта, цементирование должно происходить своевременно, в достаточном количестве и с малой усадкой объема суспензии. Во время цементирования давление заполнения отверстий должно превышать сумму давления статичных вод и давления грунта в данных точках, при этом необходимо следить, чтобы происходило именно заполнение, а не рассечение. Чрезмерное давление бетонирующей суспензии может привести к нарушению грунтовых пластов вокруг тубингов и достаточно серьезному оседанию в будущем, а также растеканию суспензии. В обратном случае, при чрезмерно малом давлении цементирования, скорость заполнения слишком мала, заполнение происходит не полностью, что также может привести к оседанию.

б) Во время осуществления различных технологических этапов щитовой проходки, с целью предотвращения оседания поверхности, возможно проведение следующих целенаправленных мероприятий:

#### (1) Начало и завершение щитопроходной работы

Для уменьшения трения между щитом и окружающей породой в процессе прохождения, конструкция щита спроектирована с увеличением размера во фронтальной части и уменьшением в хвостовой части. Размер зоны проходки резцовой головкой превышает внешний диаметр щита, подземные воды в зоне рабочей плоскости забоя могут вытекать в направлении хвостовой части щита. Таким образом, необходимо прежде всего обеспечить хороший уровень герметичности резиновых затворных уплотнений в стартовой и финальной точках пробития, а вслед за этим, после того как хвостовая часть покинет тубинг, необходимо своевременно начать заполнение бетонирующей суспензией.

#### (2) Замена резцов резцовой головки в процессе проходки

При определенном износе резца резцовой головки во время проходки, либо для адаптации к различным грунтовым пластам, необходимо производить замену резца. Замена резца, как правило, производится в состоянии пониженного давления, так как в этот период высока вероятность дестабилизации забоя, обрушения и деформации фундаментов. Значит, необходимо производить замену в местах проходки, обладающих подходящими для этого геологическими условиями и соответствующими условиями на поверхности, либо предварительно осуществлять укрепление пласта, либо производить определенные мероприятия, такие как работа сжатым воздухом и т. д., и только после этого производить замену резца.

#### (3) Прохождение под особыми защищаемыми строениями

При прохождении вблизи важных защищаемых строений, особо чувствительных к деформации основания, при недостаточном контроле есть опасность их разрушения вследствие оседания, либо вспучивания поверхности земли. При прохождении под такими строениями необходимо усилить контроль за проведением работ. С целью обеспечения защиты наземных строений и безопасности подземных коммуникаций, прежде всего, следует произвести геодезический мониторинг работ, на основании которого разработать список мероприятий по контролю оседания поверхности земли и способов защиты окружающего пространства.

Необходимо минимизировать степень нарушения, оказываемого на забой, в ходе работ избрать гибкие, быстрые и рациональные способы поддержки фронтальной поверхности, либо соответствующие значения давления сжатого воздуха для предупреждения обрушения грунтовой массы, тем самым защитить забой от излишнего воздействия. Следует строго контролировать объем выходящего грунта в процессе проходки. Во избежание излишней проходки, следует контролировать степень корректировки отклонения при продвижении щита на одно звено. Также следует увеличивать скорость работ, обеспечивать их непрерывность и т. д. Помимо этого, заполняя хвостовой технологический зазор бетонирующей суспензией под давлением, необходимо, насколько это возможно, сократить время обнаженного состояния обделки после отхода от нее хвостовой части щита, тем самым предупреждая обрушение пласта, обеспечивая необходимый количественный показатель и контроль давления цементирования. Также как и в других сферах подземного строительства, способы защиты близлежащих строений можно подразделять на: переукрепление основания, усиление конструкции, укрепление основания, перегораживание и замораживание и др.

### **3.3.5. Применение заполнителя Clay-Shock / GMEM (Grammud Effect Material) для контроля оседания**

#### *1) Состав и применение заполнителя GMEM*

Заполнитель GMEM представляет собой порошкообразное вещество, состоящее из синтетических глинистых минералов на основе кальция, коллоидного стабилизатора и сложных диспергирующих агентов. Данный материал смешивают с определенной долей воды, образуя суспензию, затем смешивают с жидким стеклом в определенной пропорции и производят перемешивание. После схватывания материал не поддается воздействию воды, получая определенные удерживающие свойства и, при низкой твердости, превращается в вязкую, никогда не затвердевающую, массу.

Оседание грунтовых пластов, вызванное щитовой проходкой, включает в себя пять стадий. Как показано на *рис. 3-20*: первичное оседание (раннее оседание), оседание по прибытии щита (проходческое оседание), оседание при прохождении щита, оседание при покидании тубинга хвостовой частью щита (оседание в зоне хвостового зазора), а также позднее оседание (последующее оседание).

Метод работ с заполнителем GMEM в основном используется для устранения оседания на стадии 3, также помогает эффективно контролировать оседание на стадии 4. Такой способ особенно полезен в процессе проходки под зданиями со слабым основанием, железными дорогами, трубопроводами и в неглубоких слоях. Данный способ использовался при: строительстве ветки № 8 Уханьского метрополитена с применением щита крупного диаметра, проходящего сквозь жилые районы;

при строительстве ветки № 7 Уханьского метрополитена от ул. Сянган до Ханькой Ань, проходящего через группы зданий;

при строительстве ветки № 7 Уханьского метрополитена под 27-й секцией железной дороги;

при прохождении под зданиями во время строительства туннеля Qinghua Garden Пекинской железной дороги Zhangjiako;

при прохождении под группой свайных фундаментов микрорайона Zhenghe во время строительства ветки № 5 метрополитена г. Чженчжоу; а также на более чем 50 объектах щитового проходного строительства по всему Китаю.

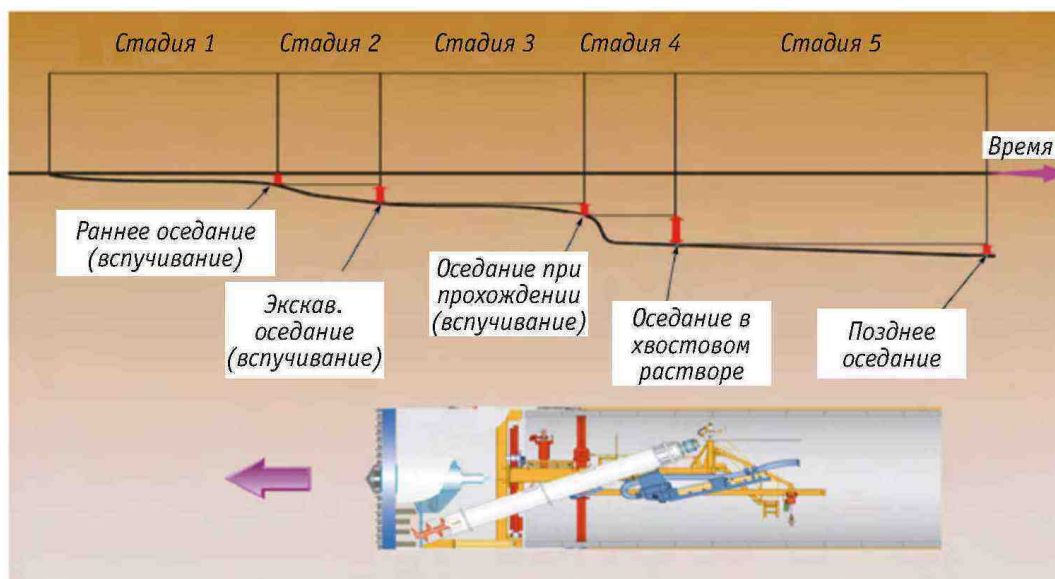


Рис. 3-19. Определение параметра потери грунта после проходки GAP

## 2) Применение заполнителя GMEM и анализ оседания на стадии прохождения щита

В процессе щитовой проходки снаружи корпуса щита в результате проходки образуется зазор, который может вызывать оседание грунтовых масс, особенно в условиях мягких пород неглубоких слоев, либо при прохождении под строениями. Для уменьшения степени нарушения вышележащего грунта, зазор заполняется различными материалами, что позволяет контролировать оседание грунта. Эти заполняющие материалы должны обладать следующими характеристиками:

(1) Материал должен обладать достаточной текучестью. Если материал не обладает хорошей текучестью, то он не может полностью заполнить все пространство зазоров вокруг корпуса щита, и не сможет создать эффективную обволакивающую защиту. Если же заполнять зазор другими пластичными материалами, они будут лишь растекаться по корпусу щита; при этом будет сложно контролировать давление заполнения и будет высока вероятность вспучивания грунтовой массы. Особенно при прохождении под опасными участками с плохим основанием: опасность вспучивания грунтовых масс может превышать опасность оседания.

(2) После заполнения зазора заполняющий материал должен создавать определенное удерживающее усилие, чтобы сдерживать оседающую грунтовую массу. Однако прочность сопротивления такого материала должна быть низкой, так как при высокой твердости значительно возрастет нагрузка на щит, что приведет к застреванию щита.

(3) Материал, после схватывания и образования пластичности, должен обладать определенной влагостойкостью, чтобы противостоять размыванию водой.

(4) Материал должен обладать определенной лубрикационной способностью, чтобы гасить сдвиговые колебания при разрезании и облегчать тяговую нагрузку на щит.

Заполнитель GMEM абсолютно удовлетворяет всем вышеперечисленным условиям и обладает следующими характеристиками и преимуществами:

(1) Заполнитель GMEM является бетонирующим материалом, состоит из двух жидкостных компонентов: при проведении работ, прежде всего заполнитель GMEM в виде порошка смешивают в определенной пропорции с водой, образуя суспензию, затем перемешивают ее с жидким стеклом, одновременно закачивая в зазор вокруг корпуса щита, заполняя его. Спустя 4 ~ 5 секунд после заполнения начинается пластификация и схватывание, так что материал,

обладая хорошей текучестью во время процесса заполнения, эффективно достигает всех зон зазора.

(2) Спустя 20 ~ 30 секунд после заполнения, заполнитель GMEM пластифицируется и схватывается, приобретая состояние пластичной глины, имея определенную вязкость и создавая удерживающее усилие. При использовании с целью контроля оседания, вязкость заполнителя GMEM после затвердевания обычно можно с помощью дозировки регулировать в пределах значений 300 ~ 350 дПас, обеспечивая сравнительно малую твердость. Такую вязкость можно сравнить с зубной пастой (300 дПас) и воском (400 дПас).

(3) После схватывания и пластификации заполнитель GMEM не поддается разбавлению водой, при этом имеет определенную лубрикационную способность, что облегчает процесс щитовой проходки.

(4) Материал заполняет пространство вокруг корпуса щита, при этом перекрывая доступ суспензии в область резцовой головки при синхронном цементировании. Образовавшаяся вокруг щита глинистая пленка из заполнителя навсегда остается по ходу продвижения щита, тем самым уменьшается возможность проникновения суспензии в грунтовый слой и достигается наиболее эффективное предотвращение оседания в процессе синхронного цементирования, что позволяет осуществлять эффективный контроль оседания на 4-й стадии.

### *3) Способ применения заполнителя GMEM (рис. 3-21)*

(1) Порошок заполнителя GMEM смешивается в определенной пропорции с водой, образуя жидкую суспензию GMEM (жидкость А). Дозировка порошка GMEM на кубический метр – 360 ~ 380 кг (показатель вязкости суспензии должен составлять около 300 дПас; для разных геологических условий и гидрологических режимов необходимо производить соответствующую корректировку дозировки);

(2) Затем жидкая суспензия GMEM (жидкость А) смешивается с жидким стеклом (жидкость В) в соотношении 20 / 1 и подается по трубопроводу в полость радиального отверстия в корпусе щита. Жидкости А и В после перемешивания через радиальное отверстие попадают во внешнее пространство вокруг корпуса щита. Так как заполнитель GMEM проникает в грунтовый слой в жидком состоянии, при выборе скорости закачки необходимо производить соответствующие корректировки. Для алевроитовых глинистых слоев выбирается скорость закачки 120% ~ 150%; для алевроитовых слоев – 130%; для окатанного гравия в зависимости от фактической плотности – 120% ~ 150%.



*Рис. 3-21. Оборудование закачки заполнителя Clay-Shock (GMEM)*

#### 4) Примеры применения заполнителя Clay-Shock (GMEM)

При строительстве метрополитена аэропорта Тайвань – Таоюань CU02A, расположенного в уезде Таоюань на восточной стороне Наньканьси, был построен траншейный крытый туннель, после прохождения через Наньканьси, туннель входил в нижнюю часть аэропорта Таоюань, проходил через западную и восточную взлетные площадки, через терминалы № 1 и № 2, через командно-диспетчерскую вышку и т. д. Также в восточной части уезда Пусинь был построен траншейный крытый туннель, протяженность подземного участка составила 5.5 км, также были построены 3 подземные автобусные станции, 10 веток щитопроходных туннелей (по 5 верхних и нижних отрезков), а также 5 траншейных крытых туннельных отрезков. В данном проекте использовались 8 щитопроходных установок с грунтопригрузом диаметром 6.24 м. Прохождение отрезка взлетно-посадочной полосы аэропорта проходило в условиях валунно-галечниковых слоев, водный уровень составлял 8 м, высота покрывающего слоя над туннелем составила 25 м.

Во время обычной проходки щита степень фронтального и среднего оседания составила около 1.3 мм; во время прохождения 57-го звена на точке № 12 через радиальное отверстие щита был закачен заполнитель GMEM и пройдено 15 звеньев с заполнением вокруг корпуса щита, при этом показатели оседания контролировались на уровне 0.2 ~ 0.3 мм. Результаты измерения оседания пласта до и после использования заполнителя GMEM можно увидеть на рис. 3-22.

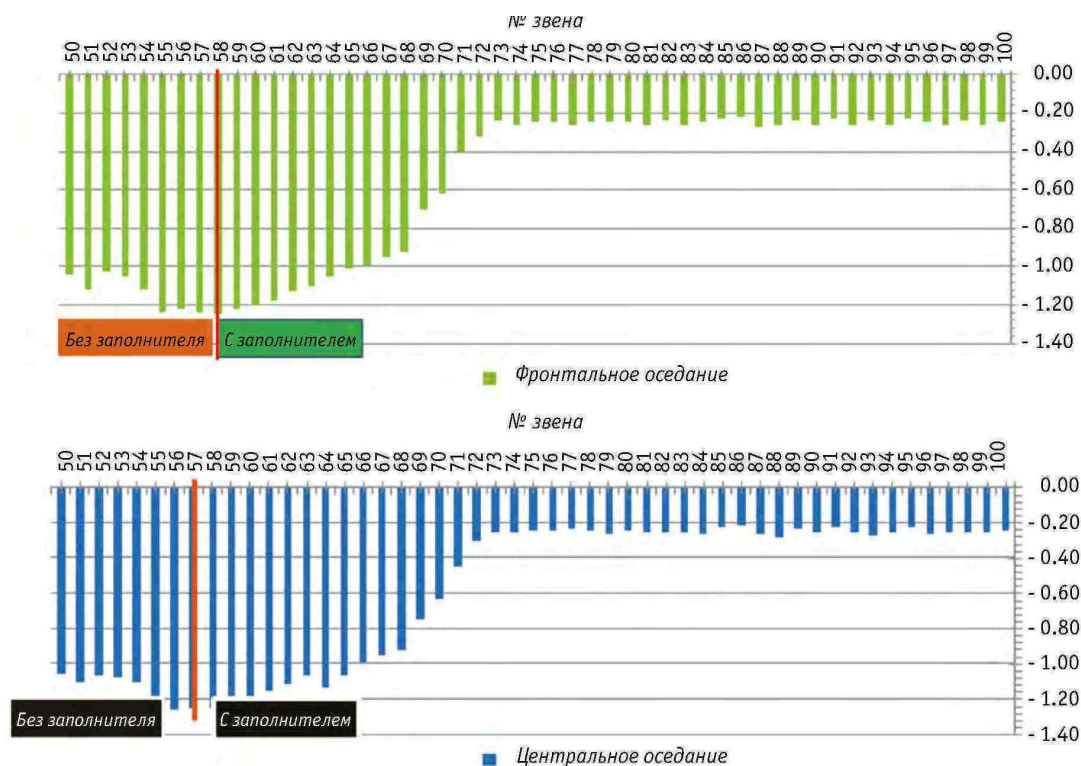


Рис. 3-22. Результаты измерений до и после использования заполнителя GMEM

## **ГЛАВА 4. ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЩИТОВОЙ ОБДЕЛКИ ТУННЕЛЯ**

Продуманная конструкция обделки щитового туннеля оказывает решающее влияние на качество всего туннеля после формовки. В отрасли существуют разногласия по поводу водонепроницаемости стыков труб, использования однослойной или двухслойной обделки для щитовых туннелей и т. д. В данной главе приводятся некоторые соображения по этим вопросам в сочетании с инженерной практикой.

### **4.1. КОНСТРУКЦИЯ ТЮБИНГА**

Как в отечественной, так и в международной практике при проектировании щитовых туннелей основное внимание уделяется безопасности, экономичности и применимости при монтаже. Проектирование тюбингов осуществляется как в поперечном, так и в продольном направлениях туннеля. Обычно проектирование в первом случае определяет поперечное сечение туннеля, а проектирование во втором – способность туннеля противостоять землетрясениям и оседанию основания. В данном разделе обобщаются и сравниваются методы проектирования, модели тюбинга, сейсмостойкость тюбинга и армирование тюбинга щитового туннеля.

#### **4.1.1. Метод проектирования туннельного тюбинга**

В настоящее время методы расчета внутренних усилий (расчет внутренней силы) для конструкций щитовых туннельных тюбингов в Китае включают метод эмпирической аналогии, метод предела сходимости, метод структурной нагрузки и метод стратиграфической структуры. Поскольку метод эмпирической аналогии не имеет теоретической базы и результатов расчета, он часто используется для оценки и дополнения других методов расчета. Тогда как принцип расчета метода предела сходимости все еще нуждается в дальнейшем исследовании и совершенствовании и часто используется для руководства строительством в сочетании с данными мониторинга строительной площадки. Метод стратиграфической структуры и метод структуры нагрузки являются теоретическими методами расчета с более строгой теоретической системой, а результаты расчета могут быть использованы для структурного проектирования и часто используются в качестве основы для проектирования. В соответствующих нормах проектирования в Китае для обычного проектирования рекомендуется метод структуры нагрузки, а в особых случаях для проверки можно использовать метод стратиграфической структуры.

В последние десятилетия метод расчета конструкции тюбинга для щитовых туннелей общего назначения среднего и малого диаметра (наружный диаметр туннеля  $D < 10$  м) обычно основывается на нагрузке. Наиболее часто используемыми моделями являются однородная круговая модель, однородная круговая модель эквивалентной жесткости, упругая шарнирная круговая модель и двухкольцевая балка – модель пружины.

В модели однородного круга не учитывается снижение жесткости стыка тюбинговой части, и тюбинговая часть рассматривается как жесткое кольцо, а структурный анализ проводится напрямую. Грунтовые и водные нагрузки рассчитываются в соответствии с проницаемостью пласта как совместный расчет или расчет грунта и воды.

Вертикальное давление грунта определяется в зависимости от глубины туннеля и характера пласта с помощью полного давления вскрышного грунта или давления провисающего грунта, расчет давления провисающего грунта может быть рассчитан по формуле Тайшаджи, горизонтальное давление грунта рассчитывается в соответствии с вертикальным давлением грунта, умноженным на коэффициент бокового давления грунта. Вертикальная сила реакции

основания определяется в соответствии с условием вертикального равновесия, а горизонтальная сила реакции основания рассматривается в диапазоне  $45^\circ$  выше и ниже центра конструкции в соответствии с законом распределения равнобедренного треугольника, и ее величина определяется в соответствии с горизонтальной деформацией, умноженной на коэффициент сопротивления основания. Эта модель возникла в Японии, поэтому ее называют общепринятой японской моделью.

Эквивалентная модель однородного кольца жесткости не учитывает напрямую существование стыков тюбинга при расчете и вводит коэффициент эффективности жесткости  $\eta$  и изгибающий момент  $\zeta$  для отражения влияния кольцевых и продольных стыков тюбинга на внутреннюю силу, что является приблизительной упрощенной моделью конструкции щитовой обделки туннеля, где  $\eta$  применяется для отражения влияния уменьшения жесткости кольцевой обделки из-за наличия стыков тюбинга, а  $\zeta$  – для отражения увеличения жесткости соседних колец обделки, поддерживаемых друг другом через межкольцевые стыки при ступенчатой сборке. Расчет нагрузки на грунт и воду и силы реакции основания в этой модели такой же, как и в однородной кольцевой модели. Для значений  $\eta$  и  $\zeta$  в Японии после ряда экспериментов были даны рекомендуемые значения для различных диаметров и различных соединений, поэтому данная модель также называется доработанной японской моделью.

Модель упругошарнирного (многошарнирного) кольца моделирует соединение тюбинга как вращающуюся пружину с определенной жесткостью или непосредственно упрощенное сочленение без учета влияния каждого кольца между частями тюбинга. Само упругошарнирное (многошарнирное) кольцо является подвижной структурой, которая может быть стабилизирована только под действием реакции вмещающей породы, поэтому такая структура может быть использована только при относительно хорошем состоянии вмещающей породы. Кроме того, при использовании модели упругошарнирного кольца точность расчета напрямую зависит от величины вращательной жесткости вращающейся пружины. Расчет нагрузки на грунт в этой модели в основном такой же, как и в однородной круговой модели, в то время как давление воды определяется в соответствии с высотой напора и затем направляется в центр формы трубчатого листа, а сопротивление грунта моделируется пружиной основания. Модель двухкольцевой балки-пружины использует вращающиеся пружины для моделирования соединений между каждым кольцом труб, а для туннелей, собранных со смещенными соединениями при моделировании кольцевых соединений используются радиальные и тангенциальные пружины сдвига. Моделирование стыковых соединений является более полным, также как и в модели упругого шарнирного кольца, точность результатов расчета модели двухкольцевой балки-пружины зависит от точности значения жесткости соединения. Расчет и моделирование нагрузок на грунт и воду и сопротивления пласта грунта в этой модели такие же, как и в модели упругого шарнирного кольца.

В последнее десятилетие появились щитовые туннели большого ( $D \geq 10$  м) и очень большого ( $D > 15$  м) диаметра. Толщина обделки увеличивается с меньшей скоростью, чем диаметр туннеля, а количество продольных швов увеличивается из-за увеличения количества отрезков труб, жесткость на изгиб конструкции обделки щитовых туннелей большого и очень большого диаметра ниже, чем у щитовых туннелей малого диаметра. Для определения жесткости контура и продольных швов необходимо использовать расчетную модель на основе модельного испытания или испытания по следам, используя либо метод структуры нагрузки пружинной модели, либо стратиграфический метод.

Основной процесс проектирования поперечного сечения тюбинга в Японии показан на рис. 4-1. В таблице 4-1 показаны методы проектирования, используемые в других странах, кроме Японии. В таблице 4-2 приведено сравнение японского и немецкого методов проектирования тюбинга, которые можно использовать в качестве справочной информации.

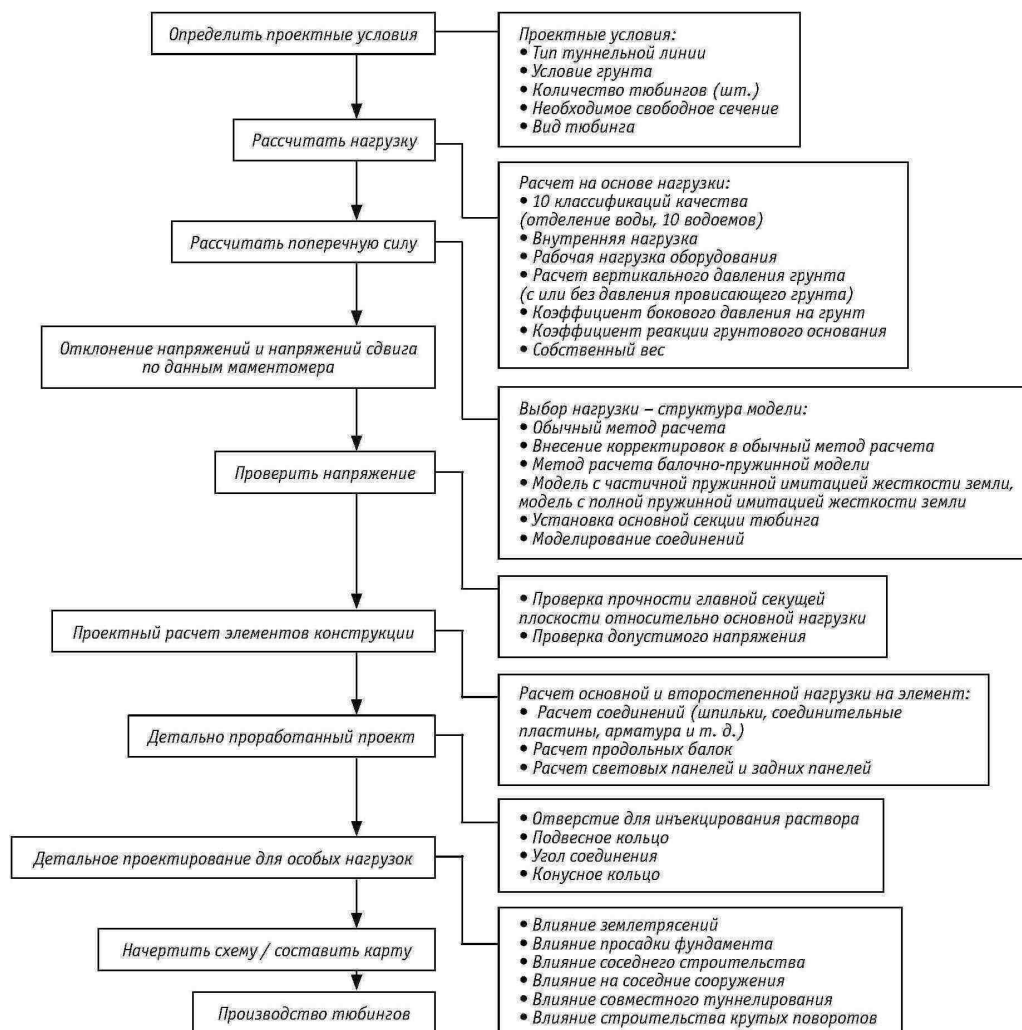


Рис. 4-1. Основной процесс проектирования тюбингов

Таблица 4-1. Методы проектирования щитовых туннелей в других странах (кроме Японии)

| Название страны | Проектные модели                                                                                                                                                                                                                                                                                 | Расчетное давление грунта, давление воды                                                                                                                                                                                                                                                                               | Коэффициент реакции грунтового основания                                                                                                                                                              |
|-----------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Австралия       | Модель с полной пружинной имитацией жесткости земли (метод Moir Wood Curtis)                                                                                                                                                                                                                     | $\sigma_v$ = Общая нагрузка на вскрышные породы<br>$\sigma_n = \lambda \sigma_v + \text{гидростатическое давление}$<br>$\lambda \geq v/(1 - v)$ ,<br>где $v$ – коэффициент Пуассона                                                                                                                                    | Обратный анализ результатов нагрузочных испытаний и измерений на плоских пластинах; полное интегрирование тангенциального направления с рабочей поверхностью, трение как интегрирование верхней линии |
| Австрия         | Модель с полной пружинной имитацией жесткости земли                                                                                                                                                                                                                                              | <ul style="list-style-type: none"> <li>Туннель мелкого заложения</li> <li><math>\sigma_v</math> = Общая нагрузка на вскрышные породы</li> <li><math>\sigma_n = \lambda \sigma_v</math> (учет давления грунтовых вод)</li> <li>Формула Терзаги для давления рыхлого грунта для глубоко заглубленных туннелей</li> </ul> | $k = E_s / r$<br><br>Рассмотрим только силу реакции в направлении радиуса                                                                                                                             |
| Бельгия         | Метод Шульце – Дуддека с использованием метода конечных элементов калибровки                                                                                                                                                                                                                     | Метод Шульце –Дуддека                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | Нет метода правильного определения коэффициентов                                                                                                                                                      |
| Германия        | <ul style="list-style-type: none"> <li>Модель с частичной пружинной имитацией жесткости земли, (за исключением верхней части) для толщины вскрышных пород <math>\leq 2D</math></li> <li>Модель с полной пружинной имитацией жесткости земли для толщины покрытия <math>\geq 2D</math></li> </ul> | $\sigma_v$ = Общая нагрузка на укрывающий грунт<br>$\sigma_n = \lambda \sigma_v (\lambda = 0.5)$                                                                                                                                                                                                                       | $k = E_s / r$                                                                                                                                                                                         |
| Франция         | Модель с полной пружинной имитацией жесткости земли или метод конечных элементов                                                                                                                                                                                                                 | $\sigma_v$ = Общая нагрузка на вскрышные породы или формула Терзаги<br>$\sigma_n = \lambda \sigma_v$ – эмпирическое значение                                                                                                                                                                                           | $k = E_1 / (1 + \mu) R$                                                                                                                                                                               |
| Китай           | Эмпирический метод                                                                                                                                                                                                                                                                               | $\sigma_v$ = Общая нагрузка на вскрышные породы<br>$\sigma_n = \lambda \sigma_v$ ,<br>где $\lambda$ – эмпирическое значение                                                                                                                                                                                            | Решается с помощью испытания вертикальной или горизонтальной нагрузочной плиты                                                                                                                        |
| Испания         | Метод Букера, учитывающий взаимодействие между окружающей породой и обделкой                                                                                                                                                                                                                     | В формуле Терзаги не учитывается сила сцепления для пренебрежимо малого сцепления ( $\lambda = 1.0$ )                                                                                                                                                                                                                  | Рассматривается только радиальное направление                                                                                                                                                         |
| Великобритания  | Общая модель с пружинами (метод Мойр-Вуда)                                                                                                                                                                                                                                                       | $\sigma_v$ = Общая нагрузка на вскрышные породы (+ давление воды)<br>$\sigma_n = (1 + \lambda) / 2 \sigma_v$ (+ давление воды),<br>где $\lambda = K_0$                                                                                                                                                                 | Результаты измерений с использованием аналогичных условий                                                                                                                                             |
| США             | Эластомерная опорная часть                                                                                                                                                                                                                                                                       | $\sigma_v$ = общая нагрузка на вскрышные породы<br>$\sigma_n = \lambda \sigma_v (\lambda = 0.4 - 0.5)$<br>и давление воды (конструкция и технические характеристики обделки туннеля не определяются математическими расчетами)                                                                                         | Расчеты произведены на основе испытаний в помещении без учета трения                                                                                                                                  |

Таблица 4-2. Сравнение японского и немецкого методов проектирования туннелей

| Проект                                                   |                                  | Железобетонная обделка из тюбингов с плоским лотком (Япония)                                                                                                           | Железобетонная обделка из тюбингов с плоским лотком (Германия)                                                                                                                    |
|----------------------------------------------------------|----------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Нагрузка                                                 | Вертикальное давление на грунт   | Высококачественные фундаменты с использованием давления рыхлого грунта (но $H \geq 1.5D$ ) (интеграция или разделение грунта и воды в зависимости от качества грунта)  | Общее давление на почву (когда $H > 3D$ )<br>Свободное давление на почву в зависимости от качества почвы (интеграция или разделение почвы и воды в зависимости от качества почвы) |
|                                                          | Горизонтальное давление на грунт | $q_e = \lambda P_e$ , в зависимости от качества почвы и величины $N$ , коэффициент бокового давления почвы $\lambda$ находится в диапазоне от 0,4 до 0,9               | $q_e = K_0 P_e$ , обычно с коэффициентом бокового давления грунта $K_0 = 0.5$ (иногда рассчитывается как $K_0 = 1 - \sin \phi$ в зависимости от качества грунта)                  |
|                                                          | Гидравлическое давление          | Вертикальная и горизонтальная нагрузка                                                                                                                                 | Рассчитано при переключении на радиальную нагрузку                                                                                                                                |
|                                                          | Сила сопротивления грунта        | Используется треугольная нагрузка, рассчитанная по коэффициенту реакции грунтового основания (Собственный вес тюбинга не учитывает силу реакции грунтового основания.) | Учитываются как пружины основания (собственный вес тюбинга учитывает силу реакции грунтового основания)                                                                           |
|                                                          | Собственный вес                  | Гравитационная нагрузка на единицу объема тюбинга $\gamma_e = 2.6 \times 10^4 \text{ N/m}^3$                                                                           | Гравитационная нагрузка на единицу объема тюбинга $\gamma_e = 2.5 \times 10^4 \text{ N/m}^3$                                                                                      |
| Нагрузка на строительный объект                          | Тяга силового гидроцилиндра      | С учетом эксцентриситета                                                                                                                                               | Без учета эксцентриситета                                                                                                                                                         |
| Используемые материалы                                   | Бетон                            | Расчетная стандартная прочность $\sigma_{sk} = 480 \times 10^5 \text{ Па}$ (образец цилиндра)                                                                          | B45: Номинальная прочность $\sigma_{sk} = 450 \times 10^5 \text{ Па}$ , кубический образец, преобразованный в прочность цилиндра $\sigma_{sk} = 380 \times 10^5 \text{ Па}$       |
|                                                          | Стальная арматура                | SD295 (SD30)<br>(предел текучести $\sigma_{sy} = 0.3 \times 10^9 \text{ Па}$ )                                                                                         | $B_{st} = 500/550$<br>(предел текучести $\sigma_{sy} = 5 \times 10^7 \text{ Па}$ )                                                                                                |
| Коэффициент деформации                                   | Бетон                            | $E_c = 3.9 \times 10^{10} \text{ Па}$                                                                                                                                  | $E_c = 3.7 \times 10^{10} \text{ Па}$                                                                                                                                             |
|                                                          | Стальная арматура                | $E_c = 2.1 \times 10^{11} \text{ Па}$                                                                                                                                  | $E_c = 2.1 \times 10^{11} \text{ Па}$                                                                                                                                             |
| Допустимое напряжение (Проектное значение)               | Бетон                            | $\sigma_{ca} = 170 \times 10^5 \text{ Па}$<br>$\tau_{a1} = 6.3 \times 10^5 \text{ Па}$                                                                                 | $\sigma_{ca} = 230 \times 10^5 \text{ Па}$<br>$\tau_{a1} = 11 \times 10^5 \text{ Па}$                                                                                             |
|                                                          | Стальная арматура                | $\tau_{a2} = 6.3 \times 10^5 \text{ Па}$<br>$\sigma_{sa} = 180 \times 10^6 \text{ Па}$                                                                                 | $\tau_{a2} = 27 \times 10^5 \text{ Па}$<br>$\tau_{a3} = 45 \times 10^5 \text{ Па}$<br>$\sigma_s = 2860 \times 10^5 \text{ Па}$                                                    |
| Защитный слой из арматурной стали (чистый защитный слой) |                                  | Для стандартных тюбингов минимальная толщина составляет 13 мм                                                                                                          | Основная арматура: $C = 3.0 \text{ см}$<br>Вспомогательный элемент $C = 1.5 \text{ см}$                                                                                           |
| Метод расчета поперечных сил                             |                                  | Общепринятый метод расчета (используя $n = 0.8$ , $\xi = 0.2$ на основе равномерной жесткости)                                                                         | Модель упругой балки (учитываются соединения тюбингов, кольцевые соединения, пружины основания)                                                                                   |
| Коэффициент реакции земляного полотна                    |                                  | Коэффициент реакции грунтового основания – $K$ составляет от 0 до $8 \times 10 \text{ Н/см}^3$                                                                         | Расчет $K = E_s / R_c$ на основе коэффициента деформации основания и диаметра туннеля (для $H > 3D$ , $K = 0.5 E_s / R_c$ )                                                       |
| Проверка корпуса тюбинга                                 | Изгиб                            | Рассчитано для железобетона (коэффициент модуля упругости $n = 15$ )                                                                                                   | Рассчитано для железобетона (коэффициент модуля упругости $n = 10$ )                                                                                                              |

| Совместная проверка                     | Сдвиг                | Рассчитано на основе железобетона                                                                                        | Рассчитано на основе железобетона                        |
|-----------------------------------------|----------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|
|                                         | Фитинг для тюбинга   | Рассматриваются болты в качестве арматуры и рассчитываются в соответствии с железобетоном                                | Отладка по силе расщепления                              |
|                                         | Кольцевое соединение | Невозможно откалибровать, необходимо использовать то же соединение, что и болт для тюбинга                               | Калибровка по сдвигу (калибровка по сдвигу тена)         |
|                                         |                      | Калибровка опорного давления с помощью упорного домкрата                                                                 | Калибровка опорного давления с помощью упорного домкрата |
| Калибровка кольцевой деформации тюбинга |                      | В проекте «Руководство по проектированию и строительству щитовых туннелей» допустимая деформация $\sigma_s \leq R_c/150$ | Допустимая деформация $\sigma_s \leq R_c/200$            |

Несмотря на то, что условия заложения щитовых туннелей важны, существуют также различия в механических свойствах, обусловленные формой сечения и методом строительства, что, естественно, приводит к выбору различных методов проектирования тюбинга, где обделка должна быть спроектирована в соответствии с этими характеристиками. Исходя из прошлой практики, большинство туннелей имеют круглое сечение, поэтому в данном разделе основное внимание уделяется методам проектирования и опыту работы с круглыми сечениями.

#### 4.1.2. Проектирование модели тюбинга

Более типичными упрощенными гипотетическими моделями тюбинга являются: кольцо тюбинга рассматривается как круглое кольцо с равномерной жесткостью на изгиб, кольцо тюбинга рассматривается как мног шарнирное круглое кольцо и кольцо тюбинга рассматривается как круглое кольцо с вращающейся пружиной. Для первой из этих упрощенных гипотетических моделей существуют общие методы проектирования и модифицированные общие методы проектирования; для второй – аналитический метод для мног шарнирных колец; для третьей – аналитический метод для моделей балка-пружина. В настоящее время в дополнение к вышеупомянутым трем типичным методам расчета конструкции тюбинга, метод проектирования с использованием пружин сдвига для оценки эффекта ступенчатого сращивания также вступил в практическую стадию.

##### 1) Общие методы проектирования

Этот метод не учитывает снижение жесткости соединения тюбинга, а рассматривает его как круговое кольцо с равномерной жесткостью. При расчете предполагается, что грунт реагирует на деформацию кольца тюбинга и решается уравнение упругости. Общий метод проектирования – это текущий метод проектирования, обычно используемый в Японии. Для этого метода проектирования необходимы конкретные расчетные формулы.

##### 2) Корректировка общего метода проектирования

Кольцо из тюбинга имеет стыки и, следовательно, пониженную жесткость. Если расчет основан на общем методе проектирования и учитывается влияние стыков, то процесс можно назвать модифицированным общим методом проектирования.

Даже если кольца расположены в шахматном порядке и сращиваются друг с другом из-за наличия швов в тюбинге общий расчетный метод коррекции предполагает равномерную изгибную жесткость  $\eta EI$  ( $\eta \leq 1$ ) для сил кольцевого сечения ( $M$ ,  $N$ ,  $Q$ ), которая меньше общей изгибной жесткости  $EI$  тюбинга, при этом параметр  $\eta$  называется эффективной скоростью изгибной жесткости.

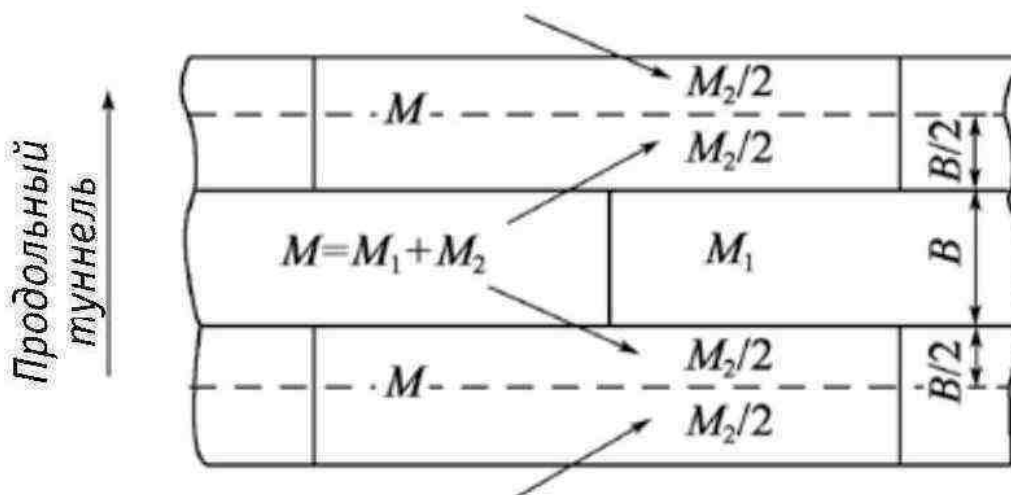


Рис. 4-2. Основная структура метода упругих шарнирных колец (продольный профиль туннеля)

Стыки тюбинга имеют некоторые характеристики сочленения, поэтому можно предположить, что не весь изгибающий момент передается стыками труб, а часть изгибающего момента передается на сцепленные соседние части тюбинга, как показано на рис. 4-2.

Этот метод целесообразно использовать для нахождения поперечных сил путем увеличения только изгибающего момента, который принимается равным  $(1 + \xi) M$ , в сочетании с осевой силой  $N$  для расчета. Параметр  $\xi$  представляет собой отношение изгибающего момента, передаваемого на соседний участок тюбинга, к расчетному изгибающему моменту и называется коэффициентом увеличения момента. Кроме того, в этом случае расчетный изгибающий момент и осевая сила соединения деталей тюбинга могут быть приняты равными  $(1 - \xi) M$  и  $(1 - \xi) N$  соответственно.

Параметры  $\eta$  и  $\xi$  изменяются в зависимости от типа тюбинга, конструктивной формы тюбингового соединения, способа сцепления колец и конструктивной формы; кроме того, на них особое влияние оказывают окружающие пласты. Теоретически метод расчета еще не установлен, но предполагается, что эти два параметра связаны друг с другом, то есть если значение  $\eta$  близко к 1, то значение  $\xi$  стремится к 0. При расчете поперечных сил с использованием модифицированного общего метода расчета, получение слишком малого значения  $\eta$  приведет к завышению сил реакции основания на пласты. В то же время, поперечные силы кольца тюбинга недооцениваются, поэтому значения этих параметров должны быть тщательно продуманы. Согласно существующей практике, значения параметров  $\eta$  и  $\xi$  определяются на основе результатов испытаний и опыта.

В связи с этим в японском стандарте на тюбинги для щитового строительства предусмотрено, что  $\eta$  обычно принимается равной 1, а  $\xi$  равно 0. Для сравнения, в некоторых проектах  $\eta = 0.8$  и  $\xi = 0.3$ . В таблице 4-3 приведены примеры комбинации  $\eta$  и  $\xi$ .

Таблица 4-3. Значение  $\eta$  в сравнении со значением  $\xi$

| Тип тюбинга                                                                                    |                                                                                                                                              |   | η%          | ξ%        | Примечание                                           |
|------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---|-------------|-----------|------------------------------------------------------|
| Японское общество гражданского строительства и Японская канализационная ассоциация             | <ul style="list-style-type: none"><li>• Тюбинг с плоским лотковым блоком</li><li>• Железобетонный тюбинг</li><li>• Стальной тюбинг</li></ul> |   | 100<br>(00) | 0<br>(30) | Указывается контрольное значение                     |
|                                                                                                | Тюбинг с плоским лотковым блоком                                                                                                             | A | 10 ~ 30     | 50 ~ 70   | Тип А: стык расположен в середине секции             |
| Проект щита национальных железных дорог Японии                                                 | Железобетонный тюбинг <sup>1</sup>                                                                                                           | B | 30 ~ 50     | 30 ~ 60   | Тип Б: стык расположен на внутреннем и внешнем краях |
|                                                                                                | Тюбинг нейтронного типа <sup>2</sup>                                                                                                         |   | —           | —         | Болтовое соединение                                  |
|                                                                                                | Железобетонный тюбинг                                                                                                                        |   |             |           |                                                      |
|                                                                                                | Тюбинг из высокопрочного чугуна                                                                                                              |   | 50 ~ 70     | 10 ~ 30   | Болтовое соединение                                  |
| Результаты испытаний швов, расположенных в шахматном порядке на поверхности земли <sup>3</sup> |                                                                                                                                              |   | 60 ~ 80     | 30 ~ 50   | Внутри пласта η > 60 ~ 80<br>ξ < 30 ~ 50             |

Примечание: 1) Как правило,  $\xi$  увеличивается по мере уменьшения  $\eta$ ; 2) Несмотря на отсутствие примеров применения на национальных железных дорогах, прогнозируется, что значения  $\eta$  и  $\xi$  будут находиться между значениями для тюбинга с плоским лотковым блоком и тюбинга из высокопрочного чугуна; 3) Является результатом испытания под нагрузкой, опубликованным в «Стандартных деталях тюбинга для щитового строительства» (дополненное издание 1982 года).

### *3) Метод анализа многошарнирного кольца*

Этот метод расчета представляет собой аналитический метод, который рассматривает шарнир как шарнирную конструкцию. Многошарнирное кольцо само по себе является неустойчивой конструкцией, но считается, что его можно превратить в устойчивую конструкцию, опираясь на реакции большой площади грунта вокруг туннеля. Предполагается, что существует равномерная радиальная сила реакции основания, распределенная вдоль кольца.

Этот метод расчета опирается на силы реакции пласта вокруг туннеля, поэтому при выборе подходящего основания необходимо соблюдать осторожность. Кроме того, во время сборки тюбинга и сразу после выпуска хвостового щита, когда силы реакции основания еще не действуют в полной мере, необходимо использовать вспомогательные средства, позволяющие кольцу тюбинга быть самонесущими, или сделать соединение тюбинга достаточно жестким, чтобы поддерживать само кольцо. Видно, что этот метод анализа обычно используется в ситуациях, когда грунтовые условия хорошие.

### *4) Метод упругого шарнирного кольца*

Поскольку кольцо щитовых туннелей состоит из нескольких сборных частей, эти части можно соединять в стыки различной формы, при необходимости скрепляя их болтами. Собранные соединения не могут иметь такую же жесткость, как монолитная железобетонная конструкция. На самом деле, стыки отдельных частей имеют не жесткий шарнир и не полный шарнир, и величина изгибающего момента, который он может выдержать, связана с жесткостью шарнира К. Внутренние силы рассчитываются путем рассмотрения кольца тюбинга как кольца упругих шарниров на стыках труб. Жесткость соединения К обычно определяется эмпирически и экспериментально. Значения внутренних сил для каждой секции могут быть получены аналитически из основной конструкции, показанной на *рис. 4-3*.

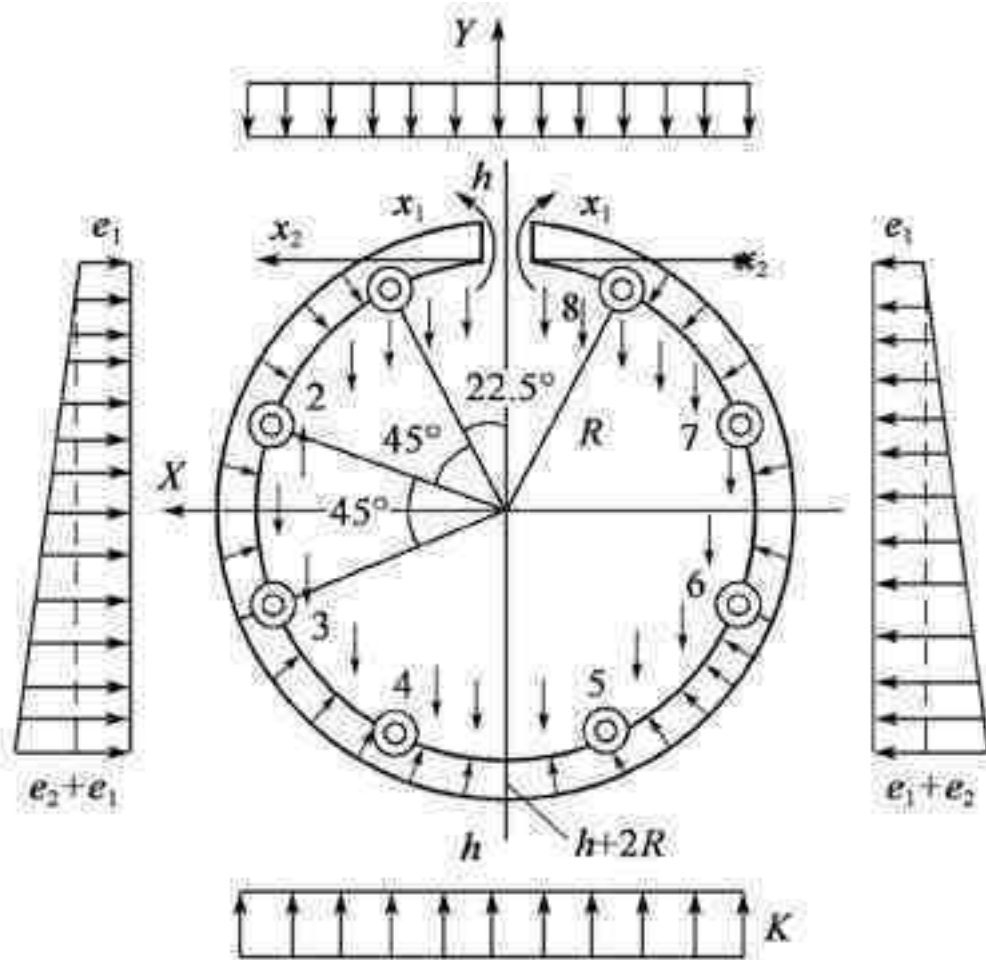


Рис. 4-3. Схематическая диаграмма аналитического метода решения значений внутренних сил для каждой секции

#### (5) Аналитический метод модели пружины-балки

Этот аналитический метод характеризуется моделированием кольца из тюбинга в виде балочной рамы (прямой или изогнутой балки), использованием вращающейся пружины и пружины сдвига для моделирования соединения тюбинга и конца кольца, соответственно, и использованием метода конечных элементов для анализа их упругих свойств для рамы и расчета поперечных сил. Этот аналитический метод является эффективным способом объяснения механизма несущей способности кольца из тюбинга.

При применении этого метода можно также рассчитать поперечные силы в случае кольцевых стыковых соединений тюбинга, двухкольцевых или трехкольцевых ступенчатых муфт и непосредственно найти поперечные силы между кольцами. Кроме того, когда постоянная величина пружины вращения соединения тюбинга равна 0, она такая же, как для многос шарнирных колец; если она бесконечна, то такая же, как для равномерно жестких колец.

В последние годы многие ученые в Китае изучали проектирование тюбинга и придумали инновационные модели, чтобы компенсировать недостатки простых моделей.

#### (1) Трехмерная модель оболочки-пружины

Используется модель полной кольцевой футеровки, состоящая из полного кольца и двух полуколец, при этом среднее полное кольцо является целью исследования, а переднее и заднее полукольца – граничными условиями для среднего полного кольца, а также ступенчато соединенной силовой кольцевой структуры. Разработана модель конструкции под нагрузкой,

а модель облицовки оболочки показана на *рис. 4-4*. Радиальное и тангенциальное сопротивление пласту моделируется пружинами. Учитывая, что сопротивление пласта грунта находится только под давлением, радиальная пружина напряжения на грунте автоматически отключается при ее вытягивании, а расположение блока пружин напряжения на земле показано на *рис. 4-5*.

Соединение тубинга моделируется вращающейся пружиной, которая плотно размещена во всех узлах на торце соединения тубинга. Пружина способна дополнить входной изгибающий момент, осевую силу и угол поворота кривой нелинейными параметрами. По сравнению с классической моделью пружинной балки, ее структурная форма и характер нагрузки в основном такие же, а основным прорывом является анализ распределения внутренних сил конструкции по амплитуде.

(2) Нагрузка – структурная модель оболочки-пружины – контактная модель

В модели «нагрузка – структурная модель оболочки-пружины – контактная модель» воздействие пласта на тубинг достигается с помощью радиальных и тангенциальных фундаментных пружин. Эта модель учитывает эффект сжатия на стыках между тубингом, перекрытие между тубингом и болтовыми соединениями, радиальное и тангенциальное сопротивление пластов тубинга, разницу между положительной и отрицательной изгибной жесткостью кольцевых соединений и угол вставки укупорочного блока. Он также обеспечивает условия для анализа продольной деформации, принимая во внимание механические механизмы растяжения болтов и сжатия водонепроницаемого материала в кольцевом пространстве во время продольной деформации. Этот метод может имитировать распространенный метод случайной сборки колец, как показано на *рис. 4-6*, и является более точным.



*Рис. 4-4. Трехмерная модель  
оболочки-пружины*

*Рис. 4-4. Трехмерная модель оболочки-пружины*

## Блок пружины напряжения грунта

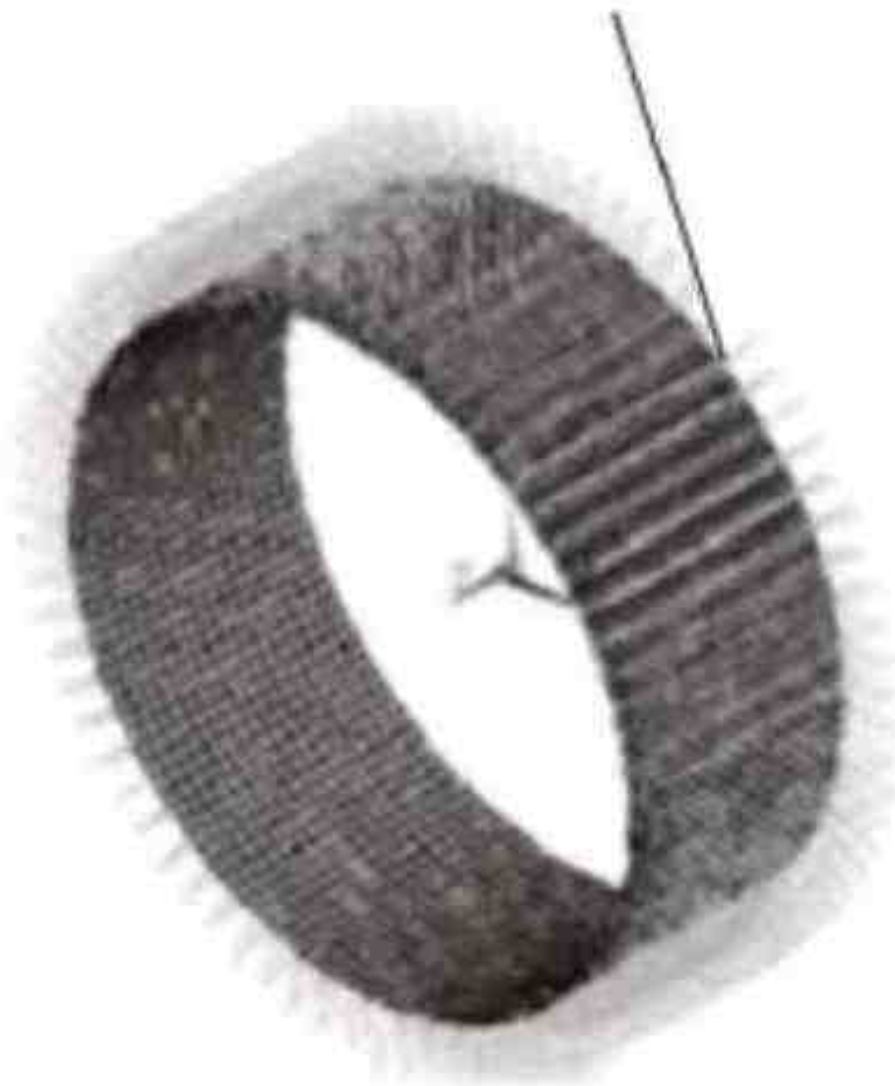
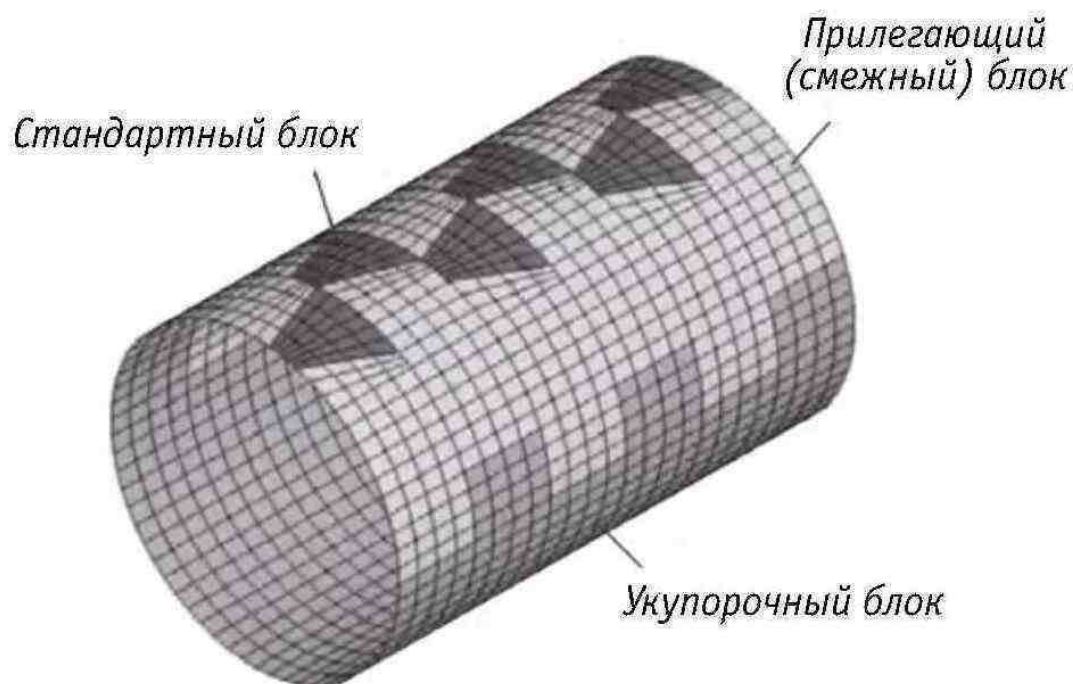


Рис. 4-5. Блок пружины  
напряжения грунта

Рис. 4-5. Блок пружины напряжения грунта



*Рис. 4-6. Разделение элементов тубинга*

*Рис. 4-6. Разделение элементов тубинга*

### (3) Стратиграфическая структурная модель с пружиной

Суть стратиграфической структурной модели заключается в учете влияния разгрузки напряжений в каверне после выемки грунта в исходном поле напряжений и совместной опоры породы периметра и структуры на стратиграфическое давление. Эквивалентные узловые силы вокруг отверстия извлекаются из рассчитанного поля напряжений собственного веса и дисконтируются с учетом снятия напряжений, затем прикладываются к узлам монолитных блоков вокруг отверстия и передаются на конструкцию туннеля через фундаментные блоки для достижения совместной опоры окружающей породы и конструкции. Процесс аналогичен процессу построения стратиграфической и структурной модели с использованием метода плоских конечных элементов. Разделение элементов конструкции и крепление болтов показано на *рис. 4-7, 4-8.*



Рис. 4-7. Положение крепления болтов

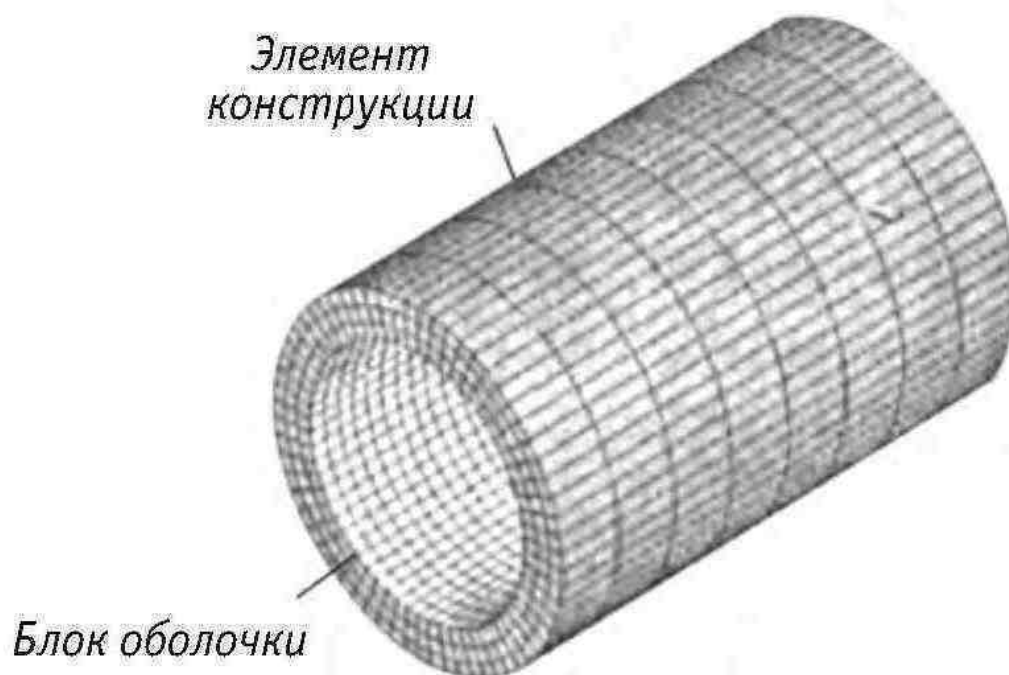


Рис. 4-8. Разделение элементов конструкции

(4) Модель оболочка-пружина с добавочным напряжением при продольной деформации  
Модель оболочка-пружина с добавочным напряжением при продольной деформации построена на основе конечных элементов, а для анализа дополнительных внутренних сил и деформаций в трехмерной структуре туннеля щита после возникновения продольных деформаций используется метод вынужденного перемещения. Данная модель была разработана с использованием блоков оболочки, блоков пружины сжатия, блоков пружины сдвига, блоков вращения

ющейся пружины и блоков контакта, следуя идее модели оболочка-пружина с добавочным напряжением при продольной деформации для анализа поперечных внутренних сил щитовых туннелей.

#### 4.1.3. Расчет нагрузки на тубинг

##### 1) Виды нагрузок и их комбинации

Разнообразие нагрузок, учитываемых при проектировании обделки, и многочисленные неопределенности в их значениях означают, что они должны устанавливаться в соответствии с различными условиями и методами проектирования, а также комбинироваться в зависимости от использования туннеля. Комбинация этих нагрузок варьируется в зависимости от назначения туннеля. Иногда даже необходимо комбинировать нагрузки в соответствии с наиболее неблагоприятными условиями, которые могут возникнуть на каждом этапе строительства и эксплуатации, например, выбирая комбинацию нагрузок, которая дает наибольшее воздействие нагрузки на конструкцию облицовки и наиболее неблагоприятные условия работы. В таблице 4-4 перечислены типы нагрузок, используемых при проектировании тубингов.

Таблица 4-4. Виды нагрузок, используемые при проектировании тубингов

| Поряд-<br>ковый<br>номер | Примене-<br>ние                            | Конструкция, находящаяся под действием силы и<br>факторы влияния                      | Тип нагрузки                         |                         |
|--------------------------|--------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------|-------------------------|
| 1                        | Посто-<br>янная<br>нагрузка                | Собственный вес конструкции                                                           | Постоянно<br>действующая<br>нагрузка | Основная<br>нагрузка    |
| 2                        |                                            | Вертикальное и горизонтальное давление земли                                          |                                      |                         |
| 3                        |                                            | Гидравлическое давление                                                               |                                      |                         |
| 4                        |                                            | Влияние вышележащей нагрузки                                                          |                                      |                         |
| 5                        |                                            | Пластовое давление (стратиграфическое)                                                |                                      |                         |
| 6                        |                                            | Сопротивление грунта<br>(сила реакции грунтового основания)                           |                                      |                         |
| 7                        |                                            | Внутренняя постоянная нагрузка                                                        |                                      |                         |
| 8                        |                                            | Влияние усадки и ползучести бетона                                                    |                                      |                         |
| 9                        | Под-<br>вижная<br>нагрузка                 | Давление почвы, создаваемое с помощью<br>временной нагрузки на грунт                  | Временная<br>нагрузка                |                         |
| 10                       |                                            | Временные нагрузки в поездах и их динамическое<br>воздействие                         |                                      |                         |
| 11                       |                                            | Временные нагрузки на дорожное транспортное<br>средство и их динамическое воздействие |                                      |                         |
| 12                       |                                            | Нагрузка от большого количества людей                                                 |                                      |                         |
| 13                       |                                            |                                                                                       | Влияние изменения температуры        | Дополнительная нагрузка |
| 14                       | Нагрузки на конструкцию проходческого щита |                                                                                       |                                      |                         |
| 15                       | Случайная<br>нагрузка                      | Воздействие горных отвалов                                                            | Специальная нагрузка                 |                         |
| 16                       |                                            | Сейсмическая сила                                                                     |                                      |                         |
| 17                       |                                            | Влияние установки параллельного<br>или перекрестного туннеля                          |                                      |                         |
| 18                       |                                            | Влияние строительства вблизи                                                          |                                      |                         |
| 19                       |                                            | Влияние осадки основания                                                              |                                      |                         |
| 20                       |                                            | Другое                                                                                |                                      |                         |

В приведенной выше таблице основные нагрузки – это основные нагрузки, которые обычно должны учитываться при проектировании тубинга. Дополнительные нагрузки – это нагрузки, которые будут приложены во время строительства и после завершения строительства туннеля, это нагрузки, которые необходимо учитывать в зависимости от использования

туннеля. Кроме того, специальные нагрузки – это нагрузки, которые должны быть специально учтены в зависимости от условий пласта, использования туннеля и т. д.

На рис. 4-9 показано распределение основных нагрузок в туннеле щита.

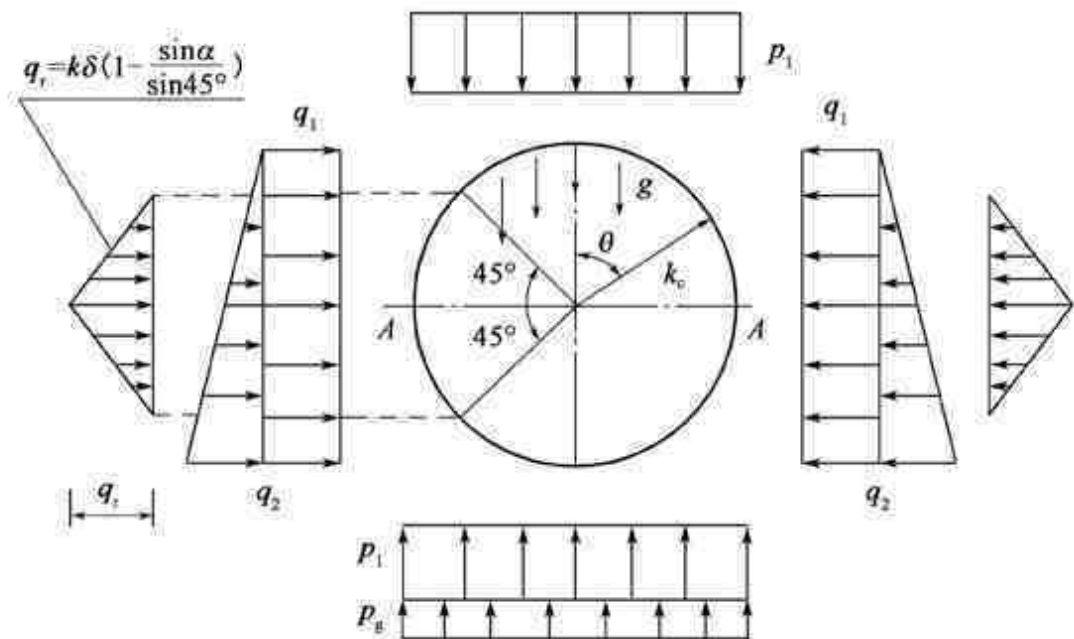


Рис. 4-9. Схематическая диаграмма распределения основных нагрузок в щитовом туннеле

$$P_1 = P_e + P_w \quad (4-1)$$

$$q_1 = q_{e1} + q_{w1}$$

$$q_2 = q_{e2} + q_{w2} - q_1$$

$$q_r = K\delta$$

$$P_g = \pi g = \pi \cdot \frac{W}{2\pi R_c} = \frac{W}{2R_c}$$

(4-1)

где:  $P_v \setminus P_w$  – вертикальное давление в грунте и гидравлическое давление (кПа);  
 $q_{e1} \setminus q_{e2}$  – горизонтальное давление в грунте (кПа);  
 $q_{w1} \setminus q_{w2}$  – горизонтальное гидравлическое давление (кПа);  $q_r$  – горизонтальное сопротивление грунта (кПа),  
 распределенное в диапазоне  $45^\circ$  выше и ниже горизонтального диаметра;  
 $K$  – коэффициент горизонтального сопротивления грунта (кН/м<sup>3</sup>);  
 $\Delta$  – А горизонтальное смещение точки (м);  
 $P_g$  – сила реакции собственного веса конструкции (кПа);  
 $W$  – вес на единицу длины кольца тьюбинга (кН).

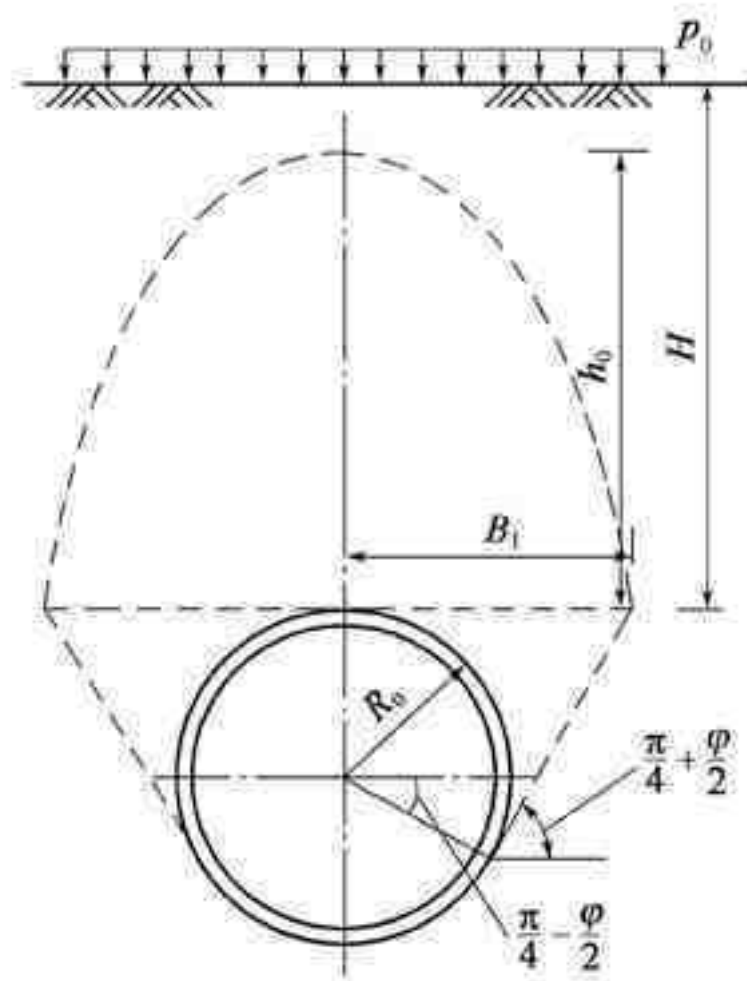


Рис. 4-10. Схема расчетной модели для давления на рыхлый грунт

2) *Давление на грунт* Давление на грунт, используемое для проектного расчета тьюбинга, состоит из вертикального давления в грунте и горизонтального давления в грунте, значения которых не зависят от деформации туннеля. Кроме того, давление грунта на дно туннеля можно рассматривать как обратное давление грунта и трактовать как силу реакции основания. Существует два способа расчета давления грунта, один из которых заключается в том, чтобы рассматривать давление воды как часть давления грунта. Другой способ заключается в расчете давления воды отдельно от давления грунта. Первый обычно используется для вязких грунтов, а второй – для песчаных почв. Для промежуточных почв нет четких критериев, но коэффициент проницаемости от  $10^{-4}$  ~  $10^{-3}$  см/с может быть использован в качестве отсекающего значе-

ния. В случае давления почвы и давления воды используется влажная мощность выше уровня грунтовых вод и насыщенная мощность ниже уровня грунтовых вод; в случае давления воды и давления почвы используется влажная мощность выше уровня грунтовых вод и плавающая мощность ниже уровня грунтовых вод.

(1) Вертикальное давление на грунт

В зависимости от расположения туннеля и условий основания вертикальное давление грунта может быть либо полным давлением вскрышных пород, либо давлением рыхлого грунта. Как правило, толщина вскрышных пород больше наружного диаметра туннеля, поэтому в случае песчаных или твердых вязких грунтов используется давление рыхлого грунта; в других пластах, где невозможно получить арочный эффект грунта, используется общее давление вскрышных пород. Для расчета давления рыхлого грунта обычно используются размеры, показанные на *рис. 4.10*, и формула Терзаги.

$$\sigma_v = \frac{B_1 \gamma - c}{K_0 \tan \varphi} (1 - e^{-K_0 H \tan \varphi / B_1})$$

(4-2a)

$$B_1 = K_0 \cot \left( \frac{\pi/4 + \varphi/2}{2} \right)$$

(4-2b),

где:  $\sigma_v$  – давление рыхлого грунта по формуле Терзаги;

$H$  – высота релаксации почвы;

$K_0$  – отношение горизонтального и вертикального давления грунта (часто принимается как  $K_0 - 1$ );

$\varphi$  – угол внутреннего трения почвы;

$p_0$  – вышележащая нагрузка;

$\gamma$  – тяжесть грунта;

$c$  – адгезия грунта.

Если  $p_0 / \gamma$  меньше, чем  $h_0$ , используется следующая формула:

$$\sigma_v = \frac{B_1 \gamma - c}{K_0 \tan \varphi} (1 - e^{-K_0 H \tan \varphi / B_1})$$

(4-3a)

$$h_0 = \frac{B_1 (1 - c/B_1 \cdot \gamma)}{K_0 \tan \varphi} (1 - e^{-K_0 H \tan \varphi / B_1}) + \frac{p_0}{\gamma} e^{-K_0 H \tan \varphi / B_1}$$

(4-3b)

В случае, если  $p_0/\gamma$  меньше  $H$ , то используется следующая формула:

$$h_0 = \frac{B_1 (1 - c/B_1 \cdot \gamma)}{K_0 \tan \varphi} (1 - e^{-K_0 H_1 \tan \varphi / B_1})$$

(4-4),

где:  $H_1$  – пересчитанная толщина вскрышных пород,  $H_1 = H + p_0 / \gamma$

## (2) Горизонтальное давление грунта

Горизонтальное давление грунта такое же, как и вертикальное давление грунта, и его сложнее точно экстраполировать. Значения горизонтального давления грунта при проектировании обычно рассчитываются путем умножения вертикального давления грунта на коэффициент бокового давления грунта.

При отсутствии сопротивления основания в качестве коэффициента бокового давления грунта можно выбрать статическое давление грунта, учитывающее условия строительства.

Коэффициент активного давления грунта используется в качестве коэффициента бокового давления грунта, если имеется сопротивление основания или коэффициент статического давления грунта соответствующим образом дисконтируется для расчета. Коэффициент бокового давления грунта следует определять не только с учетом характера грунта, но и в зависимости от метода расчета конструкции и метода строительства. Однако очень трудно установить их должным образом, и их можно определить, обратившись к таблице 4-5.

Таблица 4-5. Коэффициент бокового давления грунта ( $\lambda$ ), коэффициент сопротивления основания ( $k$ )

| Расчет давления грунта и гидравлического давления | Виды грунта                           | $\lambda$   | $k$ (кН·м <sup>3</sup> ) | Приблизительный диапазон значений N |
|---------------------------------------------------|---------------------------------------|-------------|--------------------------|-------------------------------------|
| Раздельный расчет воды и грунта                   | Плотный песчаный грунт                | 0.35 ~ 0.45 | 30 ~ 50                  | $30 < N$                            |
|                                                   | Среднеплотный песчаный грунт          | 0.45 ~ 0.55 | 10 ~ 30                  | $15 < N \leq 30$                    |
|                                                   | Рыхлый, слегка плотный песчаный грунт | 0.50 ~ 0.60 | 0 ~ 10                   | $N \leq 15$                         |
|                                                   | Уплотненный глинистый грунт           | 0.35 ~ 0.45 | 30 ~ 50                  | $25 \leq N$                         |
|                                                   | Твердая полимерная глина              | 0.45 ~ 0.55 | 10 ~ 30                  | $8 \leq N < 25$                     |
|                                                   |                                       | 0.50 ~ 0.65 | 0 ~ 10                   | $4 \leq N < 8$                      |
| Совместный расчет воды и грунта                   | Твердая полимерная глина              | 0.55 ~ 0.65 | 5 ~ 10                   | $4 \leq N < 8$                      |
|                                                   | Мягкая пластичная глина               | 0.65 ~ 0.75 | 0 ~ 5                    | $2 \leq N < 4$                      |
|                                                   | Текущая полимерная глина              | 0.70 ~ 0.85 | 0                        | $N < 2$                             |

Расчетные напряжения в сечении тубинга будут меняться из-за тонкого баланса между вертикальными и горизонтальными нагрузками. Коэффициент бокового давления грунта ( $\lambda$ ) и коэффициент сопротивления основания ( $k$ ) должны определяться тщательно с полным учетом условий заложения основания и назначения туннеля.

### (3) Гидравлическое давление

Гидравлическое давление дается при расчете давления грунта, учитывая разделение давления воды и грунта, а разница в вертикальном давлении воды действует как сила плавучести, поэтому подъем необходимо изучать с учетом других нагрузок и состояния фундаментов поверх облицовки.

Гидравлическое давление может быть определено в соответствии с изменениями уровня грунтовых вод на этапе строительства, а также во время длительной эксплуатации, различая всевозможные стратиграфические условия и рассчитывая его как гидростатическое давление или включая воду как часть грунта.

Гидравлическое давление, действующее на обделку туннеля, использует давление поровой воды, но давление поровой воды очень трудно определить, с практической точки зрения и с учетом безопасности, гидравлическое давление обычно определяется гидростатическим давлением.

Как правило, гидравлическое давление в вертикальном направлении рассчитывается в соответствии с равномерной нагрузкой. Давление воды, действующее на верхнюю часть футеровки, равно гидростатическому давлению, действующему на ее вершину, а давление воды, действующее на дно, равно гидростатическому давлению, действующему на нижнюю точку футеровки. Гидравлическое давление в горизонтальном направлении используется в качестве трапециевидной распределенной нагрузки, и его размер совпадает с гидростатическим давлением.

Кроме того, при длительном использовании туннеля из-за влияния природных или техногенных факторов уровень грунтовых вод будет меняться, и также бывает достаточно сложно

определить уровень грунтовых вод. При расчетах конструкции кольцевого щитового туннеля использование более высокого уровня грунтовых вод не обязательно означает, что он смещен в сторону безопасной конструкции; напротив, использование более низкого уровня грунтовых вод может быть наиболее неблагоприятным сочетанием условий работы с нагрузкой. Поэтому при определении уровня грунтовых вод он должен быть рассчитан в соответствии с самым высоким уровнем воды и самым низким уровнем воды соответственно.

### 3) *Соппротивление грунтовой массы*

Соппротивление грунтовой массы также известно как сопротивление образованию или сопротивление основания. Существует два способа определения сопротивления пласта: один предполагает, что сопротивление пласту не имеет ничего общего с деформацией (смещением) пласта, которая представляет собой силу реакции, уравновешенную действующей нагрузкой; другой предполагает, что сопротивление пласту связано с деформацией (смещением) пласта, которая подчинена смещению основания; под действием нагрузки часть конструкции облицовки будет деформирована в направлении вмещающей породы, поскольку вмещающая порода вокруг туннеля имеет определенную жесткость, она неизбежно создаст силу реакции на конструкцию облицовки (то есть сопротивление пласту), чтобы противостоять его деформации. В настоящее время определено большинство теорий локальной деформации, основанных на гипотезе Винкеля. Сопротивление пласту будет варьироваться в зависимости от используемой расчетной модели и метода расчета, среди которых наиболее часто используемые методы:

#### (1) Традиционный японский метод расчета

Предполагается, что вертикальное сопротивление основания не зависит от смещения основания, и в качестве сопротивления основания принимается равномерная сила реакции, уравновешенная вертикальной нагрузкой. Учитывая деформацию облицовки в направлении вмещающей породы, определено, что сопротивление основания в горизонтальном направлении действует в диапазоне центрального угла  $45^\circ$  выше и ниже горизонтального диаметра облицовки и предполагается распределенным в треугольнике с горизонтальным диаметром в качестве вершины. Сопротивление основания на горизонтальном диаметре является наибольшим, и его величина может быть рассчитана пропорционально горизонтальной деформации облицовки по отношению к вмещающей породе. Коэффициент сопротивления основания может быть принят в соответствии со стратиграфическими условиями.

$$q_r = K\delta$$

(4-5),

где:  $K$  – коэффициент реакции основания (коэффициент горизонтального сопротивления грунтовой массы) ( $\text{kH} \cdot \text{м}^3$ ).

$\delta$  – величина горизонтального смещения облицовки (м).

#### (2) Метод пружинной модели

Предполагая, что сопротивление пласта распределено радиально вдоль кольца облицовки, взаимодействие между облицовкой и пластом эквивалентно пружине, а сопротивление основания рассматривается как сила реакции, возникающая при деформации тубинга в направлении основания.

В Европе и США используется пружинная модель основания по всему периметру. В Японии в основном используется пружинную модель частичного основания, при этом большин-

ство пружин в тангенциальном направлении не рассматриваются, а в качестве эффективных пружин используются только пружины радиусного направления.

В зависимости от метода строительства целесообразно определить стоит ли учитывать сопротивление основания, возникающее в результате деформации собственного веса тубинга. Если тампонажный материал за стеной имеет лучшую первоначальную прочность или истинная округлость листа трубы после того, как он выступает из хвостовой части щита, остается лучшей (в конструкции щита используется истинное круглое устройство или лучше управление тягой движительного гидроцилиндра), можно учитывать сопротивление основания, создаваемое деформацией собственного веса листа трубы. Особенно когда наружный диаметр туннеля велик, напряжение в поперечном сечении, вызванное собственным весом, намного больше по сравнению с напряжением в поперечном сечении, создаваемым давлением почвы и воды (при  $D \geq 12$  м оно составляет от 60% до 80%).

#### 4) Вес тубингового кольца

Нагрузка собственного веса тубинга представляет собой вертикальную нагрузку, распределенную вдоль оси футеровки, и обычно рассчитывается по следующей формуле:

$$g = \frac{W}{2\pi R_c}$$

(4-6),

где:  $g$  – нагрузка собственного веса тубинга (кПа);

$W$  – сила тяжести на единицу длины облицовки (кН·м);

$R_c$  – радиус футеровочного кольца (м).

#### 5) Внутренняя нагрузка

Внутренняя нагрузка включает нагрузку, действующую в процессе строительства, и нагрузку, действующую после завершения строительства туннеля. В качестве внутренней нагрузки, действующей в процессе строительства, используются различные строительные машины и оборудование, такие как задний опорный прицеп и шлаковоз с защитной конструкцией. Когда эти нагрузки действуют на кольцо тубинга, в котором материал для затирки за стеной еще не затвердел, необходимо проверить устойчивость кольца из тубинга. Однако после того, как материал для затирки за стеной полностью затвердеет можно считать, что эти нагрузки поддерживаются окружающим основанием, поэтому на практике эти внутренние нагрузки не изучаются, но берется метод не размещения этих устройств на кольце тубинга, где тампонажный материал еще не затвердел за стенкой.

Кроме того, внутренние нагрузки, действующие при завершении строительства туннеля, варьируются в зависимости от цели использования туннеля, например, реакции железнодорожного транспорта, дорожного полотна, подвесных сооружений внутри туннеля и внутреннего давления воды. Из них нагрузки, действующие на дно туннеля, как в случае с железнодорожным транспортом, можно считать непосредственно передающимися на основание вокруг туннеля, как и внутренние нагрузки во время строительства; другие внутренние нагрузки, однако, оказывают влияние на обделку, поэтому нагрузки должны быть установлены и надлежащим образом изучены в соответствии с реальной ситуацией.

#### 6) Строительная нагрузка

Строительная нагрузка на щит – это общий термин для обозначения временных нагрузок, действующих на обделку туннеля с момента сборки тюбингов до затвердевания материала после цементации в строительной пустоте в конце щита. Нагрузки на конструкцию щита включают тягу силовых цилиндров, давление при цементации задней стенки, рабочую нагрузку машины для сборки труб и другие строительные нагрузки. Строительные нагрузки зависят от вмещающих пород и условий строительства, поэтому важно минимизировать воздействие строительных нагрузок на трубный лист и обоснованно отразить строительные нагрузки в проекте. Кроме того, уровень технологии строительства является важным фактором при проектировании обделки туннеля.

#### (1) Тяга для гребного гидроцилиндра

Сила реакции тяги для гребного гидроцилиндра щитовой проходки, действующая на обделку туннеля при щитовой проходке, оказывает наибольшее воздействие на обделку из всех строительных нагрузок. Эксцентриситет упорного цилиндра следует определять в соответствии с нетрадиционными условиями проходки щита (плоская кривая, вертикальная кривая, серпантин и т. д.) с соответствующим запасом. Однако для щитов малого и среднего диаметра с наружным диаметром около 2 – 3 м существует много случаев, когда эксцентриситет фактически составляет 30 – 40 мм.

Если эксцентриситет гидроцилиндра слишком велик, то эксцентрический изгибающий момент, создаваемый тягой силового цилиндра, вызовет растягивающее напряжение в кольцевой части тюбинга, и тюбинг легко треснет. Кроме того, когда щит прокладывает туннель на изогнутом участке, эксцентрическая нагрузка, создаваемая гидроцилиндром тяги щита, вызовет временный дисбаланс давления с обеих сторон туннеля, что приведет к сложному состоянию продольного изгибающего напряжения; соединительные болты между кольцом и кольцом, несущим изгибающее напряжение, будут склонны к сдвиговому повреждению; а чрезмерное сжимающее напряжение, действующее на облицовку трубы, вызовет локальное повреждение тюбинга. Вышеуказанные нагрузки на конструкцию должны быть тщательно учтены при проектировании.

Сила реакции тяги для гребного гидроцилиндра щитовой проходки, действующая на обделку туннеля при щитовой проходке, оказывает наибольшее воздействие на обделку из всех строительных нагрузок. Эксцентриситет упорного цилиндра следует определять в соответствии с нетрадиционными условиями проходки щита (плоская кривая, вертикальная кривая, серпантин и т. д.) с соответствующим запасом. Однако для щитов малого и среднего диаметра с наружным диаметром около 2 – 3 м существует много случаев, когда эксцентриситет фактически составляет 30 – 40 мм.

Если эксцентриситет гидроцилиндра слишком велик, то эксцентрический изгибающий момент, создаваемый тягой силового цилиндра, вызовет растягивающее напряжение в кольцевой части тюбинга, и тюбинг легко треснет. Кроме того, когда щит прокладывает туннель на изогнутом участке, эксцентрическая нагрузка, создаваемая гидроцилиндром тяги щита, вызовет временный дисбаланс давления с обеих сторон туннеля, что приведет к сложному состоянию продольного изгибающего напряжения; соединительные болты между кольцом и кольцом, несущим изгибающее напряжение, будут склонны к сдвиговому повреждению; а чрезмерное сжимающее напряжение, действующее на облицовку трубы, вызовет локальное повреждение тюбинга. Вышеуказанные нагрузки на конструкцию должны быть тщательно учтены при проектировании.

Поскольку испытание тяги отдельной части тюбинга трудно отразить общую работу кольца тюбинга, особое внимание следует уделять тем случаям, когда расчетная тяга гребного гидроцилиндра отличается от фактической тяги щитовой сборки.

#### (2) Давление цементирования

При цементировании строительного зазора хвостовой части щита вокруг отверстия для цементирования тюбинга будет образоваться временная эксцентрическая нагрузка. Эта нагрузка легко деформирует или даже разрушает лист трубы, например, неправильный этап укупорочного блока типа радиальной вставки (блок К), разрушение соединительного болта, деформация облицовочного кольца и т. д.

Давление цементации обычно определяется давлением воды и грунта, рассчитанным по вмещающей породе и глубине заглубления забоя котлована, но также необходимо определить давление цементации в соответствии с фактическими условиями строительства щита и проверить структуру трубного листа под этим давлением цементации.

### (3) Рабочая нагрузка машины для сборки тюбинга

Помимо подъемного кольца, во время сборки тюбинга на него действуют силы реакции монтажной оснастки. Проектирование должно основываться на номинальной мощности и динамическом эффекте монтажной оснастки для расчета конструктивных усилий в процессе сборки. Для бетонных тюбингов в качестве подъемных колец часто используются отверстия для болтов или отверстия для цементации. Кроме того, если отверстия для болтов или отверстия для цементации оснащены стяжными шпильками в качестве противовесов для подъема оборудования и материалов во время строительства или для предотвращения деформации кольца трубного листа, следует проанализировать и проверить предварительно заглубленные части и их сопротивление вытаскиванию.

### (4) Другие строительные нагрузки

В качестве строительной нагрузки, в дополнение к вышесказанному, следует учитывать некоторые нагрузки, такие как влияние собственного веса заднего опорного прицепа, нагрузка на домкрат, фиксатор полного круга, влияние силы вращения ножевого круга, тип щита и различное оборудование на поверхности земляных работ и т. д., а иногда нагрузка на шлаковоз и держатель трубного листа также оказывает влияние на трубный лист. Кроме того, в слоях мягкой глины и рыхлого песка, когда лист трубы выступает из хвостовой части щита, верхняя вмещающая порода разрушается до верхней части кольца листа трубы, образуя эксцентрическую нагрузку. Если эти нагрузки оказывают большое влияние на конструкцию, следует установить соответствующую нагрузку в соответствии со строительной ситуацией и проанализировать силу конструкции.

### 7) Специальная нагрузка

Специальные нагрузки – это нагрузки, которые должны быть специально учтены с учетом окружающих условий основания, условий строительства и условий эксплуатации туннеля, включая воздействие землетрясений, воздействие параллельных или поперечных туннелей, воздействие строительства вблизи, воздействие осадки основания и т. д.

Когда туннель строится параллельно на близком расстоянии, взаимное вмешательство и взаимное влияние во время строительства и эксплуатации должны быть продемонстрированы в соответствии с положением друг друга, геологическими условиями, внешним диаметром туннеля, типом щита, сроками строительства и другими условиями, и при необходимости должны быть приняты защитные меры.

### (1) Влияние параметров параллельного или поперечного туннеля

В последние годы появляется все больше примеров, когда несколько туннелей, расположенных на небольшом расстоянии друг от друга параллельно, имеют смещения и напряжения в поперечном или продольном направлении, значительно отличающиеся от смещений и напряжений в одиночном туннеле. Необходимо проанализировать влияние релаксации основания или строительных нагрузок, возникающих в результате взаимного влияния нескольких туннелей, и при необходимости принять меры, такие как укрепление обделки или основания, или предотвратить деформацию туннеля.

### 1. Взаиморасположение туннелей

Необходимо проанализировать расположение параллельных туннелей, как по горизонтали, так и по вертикали, пока расстояние между ними меньше внешнего диаметра последующего туннеля ( $1D$ ), и чем меньше расстояние, тем больше воздействие, особенно если расстояние между ними меньше  $0.5D$ . Необходим детальный анализ. Когда туннели проложены параллельно в верхнем и нижнем направлениях, строительная нагрузка последующего щита и разгрузка, сопровождающая выемку грунта, оказывают большее воздействие на предыдущий туннель. В частности, при строительстве последующего туннеля в нижней части туннеля, верхняя часть туннеля будет испытывать увеличение вертикальных нагрузок и неравномерную осадку из-за ослабления основания во время выемки грунта. Затем необходимо продемонстрировать поперечные и продольные силы и деформации в предшествующем туннеле.

## 2. Геологические условия

Помехи, создаваемые параллельными туннелями, и влияние строительных нагрузок зависят от состояния вмещающих пород.

Эффект наиболее выражен в связных пластах с высокой чувствительностью или в рыхлых песчаных пластах с плохими самонесущими свойствами. Именно здесь необходимо тщательное изучение изменения нагрузки вследствие релаксации основания.

Даже если грунт хороший или был укреплен, влияние строительных нагрузок может быть значительным, если расстояние между туннелями небольшое, тем более, если используется проходческий щит с закрытым забоем.

## 3. Наружный диаметр туннеля

В случае параллельной проходки влияние внешнего диаметра последующего туннеля является доминирующим по сравнению с внешним диаметром предыдущего туннеля, чем больше внешний диаметр последующего туннеля, тем больше влияние.

## 4. Тип проходческого щита

При параллельном строительстве туннелей воздействие последующего щита на предыдущий туннель сильно различается в зависимости от типа щита.

Когда туннели проложены параллельно в горизонтальном направлении, влияние щита с закрытым забоем на туннель заключается в эксцентрическом давлении, создаваемом упором щита при прохождении выработанного забоя, тогда как открытый щит обычно не оказывает влияния на упор, в основном из-за временного бокового давления грунта и снижения сопротивления основания, возникающего при открытом забое. В отличие от них, открытые щиты обычно не оказывают влияния на надвиг, а лишь временно снижают боковое давление на грунт и сопротивление основания из-за открытого забоя котлована. Таким образом, щитовые туннели с закрытым забоем обычно оказывают выталкивающее воздействие последующего туннеля на предыдущий туннель, в то время как туннели с открытым забоем обычно оказывают приблизительно втягивающее воздействие последующего туннеля на предыдущий туннель.

Поэтому при рассмотрении влияния параллельной проходки требуется детальный и тщательный анализ геологических условий, взаимосвязи между туннелями и различий, обусловленных типом щита.

## 5. Сроки строительства межтуннельного пространства

Как правило, строительство туннелей следует подождать пока вмещающая порода туннеля не стабилизируется перед строительством, но это трудно сделать при фактическом строительстве. Когда влияние более раннего строительства туннеля не исчезло и осуществляется последующее строительство туннеля, влияние строительства туннеля друг на друга более значительно. В это время необходимо полностью изучить сроки строительства межтуннельного пространства.

## 6. Нагрузки во время строительства

Основными факторами, влияющими на строительство передовых туннелей, являются нагрузки при строительстве последующих туннелей, включая тягу, давление забойной цемен-

тации, давление глинистой воды и давление грунта, которые действуют на передовые туннели через прижимную грунтовую массу. При эксцентрическом давлении в поперечном и продольном направлениях передового туннеля возникают аномальные смещения и напряжения. Хотя строительные нагрузки носят временный характер, нагрузки на межтуннельный грунт, вызванные тягой щитовой проходки, трудно быстро уменьшить даже после прохождения щита, а иногда они сохраняются в течение длительного времени, поэтому рассмотрению строительных нагрузок необходимо уделять должное внимание.

## (2) Влияние близкого строительства

Строительство других сооружений в непосредственной близости от завершенных туннелей приведет к возникновению возмущения на вмещающую породу на окрестности туннеля и изменению нагрузок, действующих на туннель. Из-за этого необходимо применять соответствующие защитные меры по укреплению обделки, основания и т. д. При наличии условий, эти меры должны быть учтены по возможности при проектировании туннеля по планировочной ситуации.

Влияние близости конструкции относительно велико, поэтому при разумной оценке нагрузки необходимо использовать метод расчета, который может учитывать изменение нагрузки с течением времени (история нагрузки и история напряжений в облицовке). Кроме того, если вторичная облицовка рассматривается как структурный компонент для изменений нагрузки, которые произойдут в будущем, необходимо полностью продемонстрировать структурную модель.

1. Новые сооружения строятся в верхней части туннеля или вблизи нее, и верхняя нагрузка сильно меняется.

2. Выемка грунта проводится в нижней части туннеля или вблизи нее, и условия нагрузки, такие как вертикальное давление грунта и горизонтальное давление грунта, а также свойства вмещающих пород, такие как коэффициент сопротивления основания, сильно изменились.

3. Боковое основание туннеля нарушается, и боковое давление грунта и сопротивление основания сильно изменяются.

4. Большие изменения гидравлического давления, действующего на туннель. Различие между временными и долгосрочными последствиями вышеупомянутых ситуаций должно быть тщательно проведено при выдвижении этого аргумента.

## (3) Влияние осадков основания

При строительстве туннелей в мягких или сильно изменчивых пластах, помимо просадки основания, вызванной строительством туннеля, необходимо также учитывать просадку самого исходного пласта. Последствия просадки основания ощущаются в основном в самом туннеле и в соединении туннеля с другими сооружениями, и поэтому должны быть полностью изучены.

### 1. Субстанция туннеля

Когда туннель строится в основании, находящемся в процессе консолидации, место расположения туннеля будет иметь разную величину консолидационной осадки по сравнению с окружающим основанием для части грунта, соответствующей высоте секции туннеля, так что туннель будет испытывать вынужденное смещение, эквивалентное этой дифференциальной осадке.

С другой стороны, влияние неравномерного оседания на туннель следует учитывать на участках, где продольная жесткость туннеля различна. А также на участках, где мягкие и жесткие основания ограничены или даже на слабых основаниях, которые находятся в процессе консолидационного оседания или где консолидационное оседание произойдет в будущем, а также на участках, где толщина мягкого и слабого грунта под туннелем значительно различается.

В этих случаях, когда механика туннеля не ясна, прочность обделки проверяется путем моделирования боковой структуры туннеля, либо путем увеличения вертикального давления

грунта, либо путем принудительного смещения пружин основания. При продольной неравномерной осадке туннеля учитывается осадка основания в месте расположения туннеля с помощью пружин основания, которые моделируют процесс слежения за туннелем при неравномерной осадке основания, и при необходимости принимаются такие меры, как снижение продольной жесткости туннеля, уменьшение осадки за счет усиления основания и увеличение чистого сечения туннеля.

## 2. Секция соединения туннеля и шахты

В месте соединения туннеля и шахты, поскольку соединяются две разные конструкции, могут легко возникнуть относительные смещения. В качестве альтернативы следует обработать основание шахты, чтобы уменьшить эффект неравномерного оседания. Кроме того, для обеспечения запаса высоты эффективным методом является увеличение поперечного сечения.

### (4) Воздействие землетрясений

При рассмотрении последствий землетрясений следует провести тщательные исследования с учетом важности туннеля, его окрестностей, состояния вмещающей породы, сейсмической интенсивности района, в котором он расположен, структуры и формы туннеля и т. д., а также принять необходимые сейсмические меры.

Подземная конструкция значительно менее подвержена землетрясениям, чем наземные из-за ограничений, накладываемых грунтом, и когда толщина покрова туннеля достигает определенного уровня, можно предположить, что туннель и основание генерируют практически одинаковую вибрацию. Однако воздействие землетрясений на туннель сильнее при следующих условиях и требует тщательного изучения.

1. Изменения в конструкции обделки, например, подземные соединения и соединения с шахтами: изменения в структуре туннеля и напряжения в сечении в зонах структурных изменений.

2. Туннели, расположенные в мягком грунте, могут испытывать значительные осадки из-за снижения прочности и бокового движения грунта при сейсмических или других повторяющихся нагрузках, известные как «сейсмическая просадка», которые должны быть специально проанализированы с учетом конкретных условий участка.

3. Когда изменяются условия основания, такие как вид грунта, толщина покровного слоя, глубина залегания коренных пород: деформация продольного основания туннеля различна, и напряжение поперечного сечения возникает в продольном направлении туннеля.

4. Криволинейный участок с резкими поворотами: напряжение участка возникает в осевом направлении из-за резкого изменения направления между направлением падающей сейсмической волны и осевым направлением туннеля.

5. В рыхлых, насыщенных песком основаниях, где существует вероятность разжижения: разжижение может вызвать подъем туннеля и нельзя игнорировать последствия землетрясений.

В частности, во время землетрясений относительно большие напряжения в сечении неизбежно возникают в той части туннеля, где конструкция туннеля соединена с конструкцией шахты, которая полностью отличается от остальной части туннеля, поэтому для уменьшения продольной жесткости этой части туннеля целесообразно предусмотреть гибкие тубинги или использовать резиновые прокладки или эластичные прокладки между кольцами тубинга для придания им гибких соединений.

## 4.1.4. Методика обоснования сейсмостойкости тубинга

### (1) Обоснование устойчивости туннеля и строительного участка

Если туннель находится на участке, где существует риск разжижения грунта из-за давления поровой воды, превышающий статическое, то формируется область подземной циркуляции с потоком, направленным вверх, и он теряет прочность. Что может привести к снижению

нагрузки грунта в верхней точке туннеля, к потере его сопротивляемости силе выталкивания, вследствие чего может возникнуть вероятность поднятия туннеля.

#### (2) Механическое обоснование поперечного направления сечения туннеля

В настоящее время в КНР анализ сейсмостойкости поперечных сечений подземных туннелей по большей части проводится согласно принципу сейсмического коэффициента. Основная исходная точка данного метода – воздействие землетрясений на подземную структуру, по большей части состоящая из двух частей. Первая – вес структуры и перекрывающего слоя породы создают инерционную силу пропорциональную сейсмическому ускорению поверхности, вторая – самопроизвольное увеличение бокового давления, вызываемое землетрясением.

Если весовая плотность туннеля (вес одного погонного метра туннеля/площадь поперечного сечения туннеля) легче или практически тождественна с весовой плотностью вмещающей породы, то обычно это является следствием землетрясения, сопутствующие толчки вызывают серьезные видоизменения, сдвиги вокруг строительного участка, при этом, инерционная сила не принимается в расчет. Аналитический метод сейсмостойкости, основанный на данной концепции, получил название «метод спектров реакции», или «теория коэффициента динамичности». Особенностью теории является принятие во внимание смещений пластов, расположенных в подземных структурах, которые становятся входом землетрясения в структуру. Метод спектров реакции проводит расчеты для смещений расположения участков туннеля. Метод учитывает все смещения или смещенные участки, действующие на туннель, и производит расчеты давления на сечение туннеля и стрелы деформации.

#### (3) Механическое обоснование продольного направления сечения туннеля

Расчеты сейсмоустойчивости продольного направления сечения туннеля чаще всего основаны на методе спектров реакции. При проведении расчетов, исходя из состояния всех участков туннеля, устанавливается необходимая длина волны. Предполагается, что смещение участков, полученное методом реактивного смещения, является синусоидальной волной, которая действует на туннель и оказывает давление на верх продольного сечения и объем его изменений. Данный метод является часто применяемым методом расчетов.

Что касается жесткости туннеля, необходимо принять во внимание то, что первичное соединение обделки снижает жесткость. Следует учитывать влияние вторичной и последующих обделок. Решение стоит принимать после тщательного планирования структуры туннеля. Необходима проверка проекта на напряжение сечения и стрелы деформации частей первичного и вторичного соединения обделки, напряжение и величину смещения мест соединений вертикальной шахты сечения.

#### (4) Метод динамического анализа

Для метода спектров реакции и метода сейсмического коэффициента применяют изменяющиеся со временем сейсмическое действие взамен статической нагрузки или замены статического перемещения, затем используют модель статистического расчета для нахождения отклика структуры. Постепенно примеров проведения динамических расчетов с использованием вычислительной модели совместного влияния сооружения и участка становится больше. Если точно определить материал конструкции и нелинейные параметры элементов конструкции, можно применить динамический расчет, чтобы обнаружить динамику каждой части сооружения во время землетрясения. Вследствие нерациональности входной сейсмической волны и сложности интерпретации результатов расчетов, а также отсутствия определения окончательного способа расчетов к настоящему времени, метод не достиг уровня полного принятия.

### **4.1.5. Анализ распределения арматуры тюбинга**

#### *1) Насыщенность арматурой бетона для тюбинга в метро (КНР)*

За последние 20 лет при использовании проходческих щитов в Китае было построено большое количество веток метро, структурное укрепление которых является характерным, что

по большей части отражает достигнутый в КНР уровень проектирования. Для определения насыщенности арматурой тьюбингов метро, возводимых с помощью проходческих щитов, изучили различные регионы, качество почвы и возможные диаметры туннелей, проведя исследование содержания арматуры 38 веток метро в 21 городе КНР. По большей части содержание составило 140~210 кг/м<sup>3</sup>. Самое низкое содержание арматуры наблюдалось в Чунцине, где туннели прорываются в средневыветренных песчаных аргиллитах, и составляло 120 кг/м<sup>3</sup>. Самое высокое содержание арматуры наблюдалось в Ханчжоу, где алевроитовая почва, много отложений глины. В такой мягкой почве сооружение туннелей требует повышенного содержания арматуры, достигающего 253 кг/м<sup>3</sup>. Данные факты отражены в *таблице 4-6*.

*Таблица 4-6. Исследование содержания арматуры в метро КНР*

| №   | Регион     | Название проекта строительства             | Общее описание качества почвы                                                     | Тьюбинг (диаметр/толщина (м)) | Содержание арматуры (кг/м <sup>3</sup> ) |
|-----|------------|--------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------|------------------------------------------|
| 1.  | Гуанчжоу   | 8-я линия метро                            | Глинистый алевролит ~ слабо выветренный пласт                                     | 6/0.3                         | 175                                      |
|     |            | 11-я линия метро                           | Глинистый алевролит, алевролит, мелкозернистый песчаник ~ слабо выветренный пласт | 6/0.3                         | 175                                      |
| 2.  | Наньчан    | 3-я линия метро                            | Средневыветренный глинистый алевролит                                             | 6/0.3                         | 178                                      |
|     |            |                                            | Гравелистый песок                                                                 | 6/0.3                         | 148                                      |
| 3.  | Дунгуань   | Линия метро R2                             | Остаточная аллювиальная почва, сильно выветренный смешанный гнейс                 | 6/0.3                         | 161                                      |
| 4.  | Наньнин    | 1, 2, 3-я линии метро                      | Алеврит, песок, мелкая галька                                                     | 6/0.3                         | 159/166/173/201                          |
| 5.  | Пекин      | 16-я линия метро                           | Слой галечника, диаметр гальки 10 – 30 см                                         | 6.4/0.3                       | 142                                      |
|     |            | 8-я линия метро                            | В основном окатанный галечник, вязкая почва, часть – пылеватый грунт              | 6/0.3                         | 138                                      |
|     |            | 6-я линия метро                            | Проходит через гальку, смешанную с алевроитом и мелким песком                     | 6/0.3                         | 170                                      |
|     |            | 7-я линия метро                            | Слой галечника                                                                    | 6/0.3                         | 176                                      |
| 6.  | Шэньян     | 2, 9, 10-я линии метро                     | Гравелистый песок, слои круглой гальки                                            | 6/0.3                         | 135                                      |
| 7.  | Тяньцзинь  | 2, 4, 6, 10-я линии метро                  | Алевритовая глина, алевроит, пылеватый грунт                                      | 6.2/0.35                      | 135/170/229<br>141/180/234               |
|     |            | Новый район Биньхай линии Z4, B1           | Алевритовая глина                                                                 | 6.6/0.35                      | 200                                      |
| 8.  | Далянь     | 1-я линия метро                            | Слой галечника, сильно/средневыветренный сланец                                   | 6/0.3                         | 128                                      |
| 9.  | Шицзячжуан | 1-я линия метро                            | Желтая алевроитовая глина, желтый пылеватый грунт, мелкий и крупнозернистый песок | 6/0.3                         | 159~182                                  |
| 10. | Харбин     | 2, 3-я линии метро                         | В основном – мелкий и крупнозернистый песок                                       | 6/0.3                         | 165/175/185                              |
| 11. | Чанчунь    | Между станциями Фаньжунлу и Вэйсин гуанчан | Алевритовая глина и глина                                                         | 6/0.3                         | 150                                      |

|     |          |                                                                     |                                                                                                                                                           |           |                  |
|-----|----------|---------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|------------------|
| 12. | Чунцин   | Между станциями Чунцин си и Шанцяо                                  | Песчанистые аргиллиты, горные породы, средневыветренная почва                                                                                             | 6.6/0.35  | 129-169          |
| 13. | Чжэнчжоу | 1-я линия метро 02 участок                                          | Пылеватый грунт, алевроитовая глина                                                                                                                       | 6.28/0.3  | 180              |
|     |          | 2-я линия метро 04 участок                                          | Пылеватый грунт, мелкозернистый песок                                                                                                                     | 6.28/0.3  | 179              |
|     |          | 5-я линия метро 05 участок                                          | Клейкий пылеватый грунт, алевроитовая глина                                                                                                               | 6.45/0.35 | 159              |
| 14. | Ухань    | Между станциями Вэйлай саньлу и Цзолин                              | Алевроитовая глина, остаточная аллювиальная почва, слабосцементированный глинистый песчаник, цементированный глинистый песчаник, цементированный песчаник | 6.2/0.35  | 148/168/189      |
| 15. | Уси      | 3-я линия метростроительное проектирование 05 участок               | Пылеватый грунт, алевроит, алевроитовая глина, пласт глин                                                                                                 | 6.2/0.35  | 144/161 /172/200 |
| 16. | Сучжоу   | 5-я линия метро                                                     | Смесь алевроита и пылеватого грунта, алевроитовая глина, смесь пылеватого грунта и алевроита                                                              | 6.7/0.35  | 154/158/173      |
| 17. | Сямэнь   | Участок проходки в области суши 3-й линии метро                     | Сильно выветренный, полностью выветренный гранодиорит, остаточный пласт песчаного вязкого грунта                                                          | 6.2/0.35  | 165/194          |
|     |          | Участок проходки в области моря 3-й линии метро                     | Сильно выветренный гранодиорит, глина, алевроитовая глина, гравийный песок                                                                                | 6.7/0.35  | 178              |
| 18. | Циндао   | 2-я линия метро                                                     | Проходит через сильно выветренную зону разломов, дайковая порода                                                                                          | 6/0.3     | 162              |
| 19. | Нанкин   | Участок 3-й линии метро между станциями Шэнтай силу и Тяньюань силу | В пласте неравномерно распределены мягкие и твердые породы                                                                                                | 6.2/0.35  | 140/166/187      |
|     |          | Участок 3-й линии метро между станциями Пучжаньлу и Биньцзянлу      | Проходит через насыщенные водой участки, с сильной водопроницаемостью, не устойчива при воздействии                                                       | 11.2/0.5  | 145/158/192      |
| 20. | Ханчжоу  | 2-я линия метро                                                     | Мягкий грунт, насыщенные водой участки с разной водопроницаемостью, сравнительно богатые подземными водами.                                               | 6.2/0.35  | 139/179 /208/232 |
|     |          | 5-я линия метро                                                     |                                                                                                                                                           | 6.2/0.35  | 136/173 /210/272 |
| 21. | Чанша    | Первая очередь строительства 2-й линии метро                        | Сильно, средневыветренный сланец                                                                                                                          | 6/0.3     | 165              |

## 2) Сравнение различий армирования элементов строительства проходческих пространств метро в КНР и других странах

КНР не часто принимает участие в разработке проектов метро и других строительных объектов за рубежом, поэтому сложно получить большое количество относительно достоверных зарубежных расчетных параметров. Китайская корпорация железнодорожных туннелей получила проект строительства западного сектора красной ветки метро в городе Тель-Авив (Израиль), а также на нее была возложена миссия выполнения генерального подряда работ на данном объекте. Строительство объекта осуществлялось по европейским стандартам, диаметр щитового туннеля составил 7.2 м, толщина тубинга 0.35 м, основной почвой проходки был мелкий песок, сильно выветренный Kurkar (сходный с песчаником), ГГВ в верхней точке туннеля по проекту – 1 – 8 м, содержание арматуры приблизительно 120 кг/м<sup>3</sup>. Ниже проведем анализ со сходным проектом в КНР:

(1) Внешний диаметр тубинга у данного туннеля сравнительно большой, достигает 7.2 м, в КНР за обычный диаметр считается 6 м, 6.2 м, самый большой – 6.7 м.

(2) Толщина тубинга – 0.35 м, приблизительно такая же, как и в КНР.

(3) Для армирования тубинга применяют метод сеточного армирования, лицевые и каркасные стойки крепятся вместе, образуя сетку арматуры, обычно арматура монтируется в области болтовых отверстий. В КНР продольную арматуру гнут и приваривают стыковым швом к каркасным стойкам, так образуется арматурный каркас. В верхней части есть болтовые отверстия, болт крепится и соединяется с торцевой поверхностью симметрично распределенного каркаса арматуры. Некоторые тубинги снабжаются кольцевой арматурой для увеличения сопротивляемости стыков.

(4) Продольная арматура тубингов – Т14, среднее расстояние между элементами – 150 мм. В КНР применяется продольная арматура диаметром от 16 мм и выше, среднее расстояние между элементами равно 125 мм.

(5) Распределительный арматурный стержень тубинга равен Т10, среднее расстояние между стержнями – 160 мм. В КНР распределительный арматурный стержень тубинга равен 12 – 14 мм, среднее расстояние между стержнями – 160 мм.

### *3) Анализ причин различий*

(1) Во время строительства каждой ветки метро в КНР участок строительных работ делится на 3 – 5 отрезков, так удобнее распределять тубинги между строительными организациями. Обычно, принимая во внимание геологические условия каждой метротрассы и глубины залегания, предоставляются 1 – 4 вида универсальных карт распределения арматуры. Проектные подразделения каждого участка проводят повторные вычисления, исходя из конкретного состояния своего отрезка, и из универсальных чертежей выбирают различное распределение арматуры. Принимается во внимание инклюзивность, часто используемый тип армирования превышает потребности участка.

(2) При внутренних расчетах армирования элементов строительства проходческих пространств метро в КНР обычно прибегают к привычному методу, применяемому в Японии (нагрузка – структурная модель). На красной ветке в городе Тель-Авив применяется метод структуры пласта (скалистый грунт – структурная модель). Первый метод уменьшает твердость соединения тубингов и увеличивает средний изгибающий момент. Второй метод не учитывает влияние на соединение, а исходит из гомогенности грунтов. С точки зрения расчетного усилия первый способ превосходит второй.

(3) В КНР проектанты, применяя японский метод, проводят анализ внутренних сил. Затем для проведения расчетов несущей способности, объем армирования часто уменьшается соответственно параметру проектных продольных сил, или стандартные параметры продольной силы заменяют проектные. Вплоть до того, что иногда проводятся расчеты плоских изгибов конструкции, что приводит к увеличению объемов арматуры. Однако в туннелях подобной кольцевой структуры продольная сила оказывает сильное итоговое влияние на арматуру. Если не определен такой параметр, как качество почвы, или сложно определить количество интервалов вследствие их чрезмерности, то для вышеизложенного метода проводится расчет количества арматуры.

(4) Строительный цикл сооружения проектов метро в КНР сравнительно короткий, а время геологоразведочных работ еще короче: время исследования одной метротрассы не превышает года. В Тель-Авиве все работы, связанные с геологическими исследованиями и подведением результатов, заняли более 5 лет. Отбросив время на согласование, получим не менее 3 лет, ушедших на сбор данных на месте и исследовательскую деятельность. В КНР инженерные исследования завершают в сжатые сроки, при этом удовлетворяются требования существующих стандартов. Количество образцов внутренних и полевых испытаний в КНР меньше, чем за рубежом. В то же самое время, технический персонал, производящий исследования, испы-

тывает беспокойство по поводу изменчивости подземного инженерного геологического строения. Предоставляемые параметры почвы устаревают, что приводит к отклонениям в сторону в результатах расчета внутренних сил конструкции.

(5) До 2010 года при сооружении строительных проектов метро в КНР использовалась несущая арматура HRB335, проектная прочность которой была низкой. Предел ее текучести по европейским стандартам составляет 400 – 600 МПа. В тождественном по внутренним силам проекте, в КНР используют большее количество стали. С течением экономического и технического развития и прогресса в КНР, свойства арматуры улучшились. В настоящее время по большей части используют несущую арматуру HRB400, с соответствующим пределом текучести – 400 МПа. Не смотря на улучшение технических характеристик арматуры, из-за многолетнего проектирования по инерции, некоторые участки с арматурой в регионах остались без изменений, диаметр арматуры все еще начинается с 16 мм. Данный факт приводит к тому, что в настоящий момент в некоторых районах существующий объем арматуры не уменьшился с улучшением свойств материала. За последние два года в целом ряде проектных организаций обнаружилось проблемы. В только построенных тубингах проходческих пространств, содержание стали снизилось. Например, в Чуньцине, Даляне, Шэньяне и других городах, содержание стальных конструкций уменьшилось до 120 – 135 кг/м<sup>3</sup>.

#### **4.2. ВОДОНЕПРОНИЦАЕМАЯ КОНСТРУКЦИЯ СВАРНЫХ ШВОВ ТЮБИНГА**

В туннелях проходческого типа применяют болтовые соединения, содержится огромное количество стыковых подземных конструкций, вследствие обделки тубинга и погрешностей монтажа, в торцевой поверхности соединений возникают неровности, что приводит к прерывистости конструкции. В то же самое время смещение пластов приводит к структурной деформации тубинга туннеля. Накопленные ранее погрешности и деформации приводят к расхождению швов тубинга, вследствие целого ряда причин швы теряют свои водоизоляционные свойства. В настоящее время невозможно построить полностью водозащищенный туннель.

В настоящее время основными способами гидроизоляции являются: герметичное цементирование тубинга снаружи, герметичный бетонный тубинг, водонепроницаемые швы, вторичная герметичная обделка. Все четыре составляющих важны, но, не включая герметичный бетонный тубинг, самым ключевым пунктом являются герметичные швы тубинга. Герметичные швы тубинга достигаются с помощью герметичной уплотнительной прокладки между тубингами, герметичной подкладки. С внутренней стороны соседнего тубинга выполняют зачеканенный герметичный шов и крепление болтами, герметизирование монтажного проема. Надежность обеспечивает герметичная уплотнительная прокладка, которая является основой непроницаемости шва. Принцип непроницаемости прокладки заключается в том, что нормальное напряжение контактной поверхности прокладки больше чем давление внутренних вод, оказываемое на тубинг, и радиальное напряжение в области продольного шва. В проектирование важно количество прокладок на туннель, их форма, размер и материал.

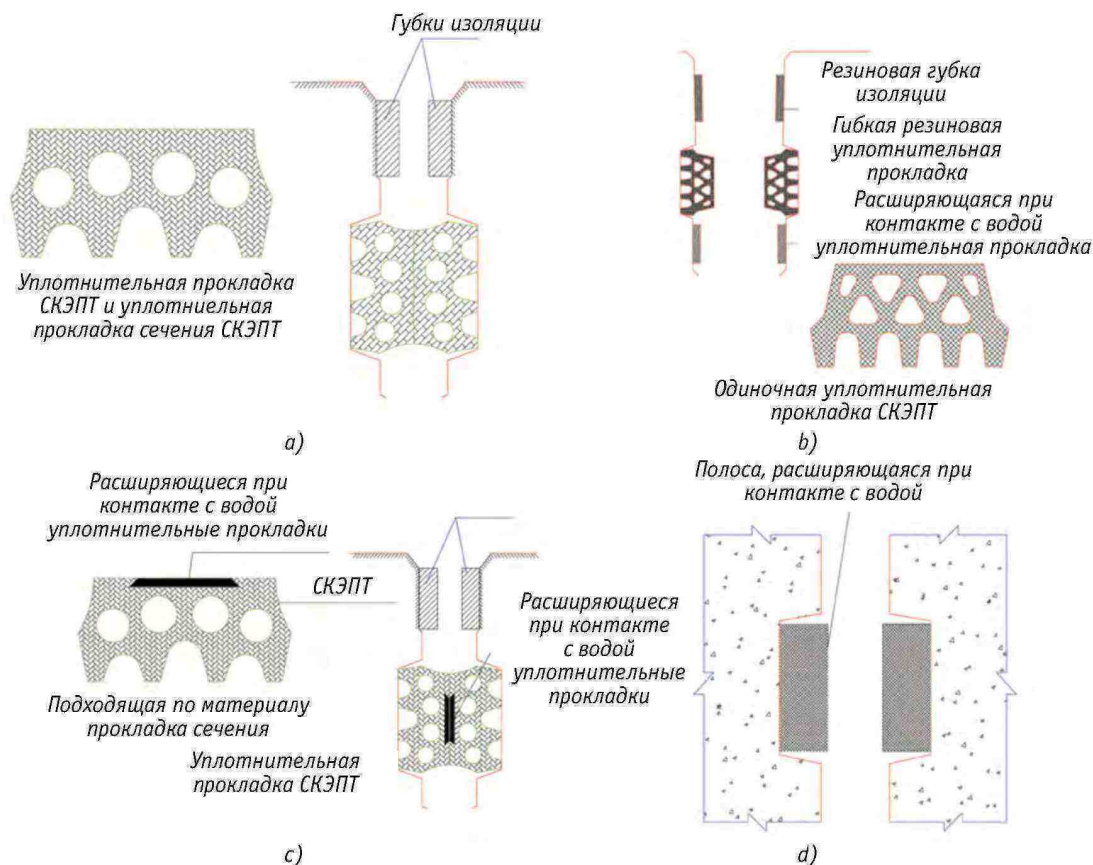


Рис. 4-10. Уплотнительные герметичные прокладки: а) уплотнительная прокладка; б) уплотнительная прокладка СКЭПТ и расширяющаяся при контакте с водой прокладка; в) подходящая по материалу прокладка сечения; д) расширяющаяся при контакте с водой уплотнительная прокладка

#### 4.2.1. Выбор количества уплотнительных прокладок

Согласно исследованиям для обеспечения герметичности швов в подавляющем большинстве случаев используют уплотнительные прокладки в КНР и за рубежом. В туннелях среднего и малого диаметра применяются одиночные прокладки или расширяющиеся при контакте с водой уплотнительные прокладки. В КНР большая часть туннельных пространств имеет большой радиус, в таких туннелях применяются герметичные прокладки или прокладки, валик которой при контакте с водой расширяется. Например, подводный туннель в Токийском заливе (внешний диаметр 13.9 м), Эрресунский мост (внешний диаметр 8.5 м), Шанхайский туннель через Янцзы (внешний диаметр 15 м), мост через залив Ханчжоувань (внешний диаметр 11.3 м), туннель в городе Чанша (внешний диаметр 11.3 м).

Существуют примеры применения двойных прокладок, которые в одинаковой степени проявляются в КНР и за рубежом. Например, Уханьский туннель Чанцзян (внешний диаметр 11 м), туннель Шицзян между Шэньчжэнем и Гонконгом (внешний диаметр 10.8 м), туннель Нанкин Динхуаймень через реку Янцзы (внешний диаметр 14.5 м), старый туннель под Эльбой в Гамбурге (внешний диаметр 13.75 м) и другие. Расположение уплотнительных прокладок в данных туннелях показано на рис. 4-11.

При применении двойных уплотнительных прокладок, можно усилить характеристики герметичности тубинга, что касается применения герметичной внутренней боковой про-

кладки, возникают трудности с ее надлежащим распределением, таким образом, защита от воды шва у внутреннего сальника ограничена. В то же время, при монтаже двойной уплотнительной прокладки (особенно для продольных швов) необходимо применить большую силу сжатия при соединении, только при таком условии можно посадить уплотнительную прокладку в канал уплотнения. Возникают трудности при соединении, которые оказывают негативное воздействие, при этом стоимость строительства заметно увеличивается.

Было проведено обследование и изучение уже построенных проходческих щитов малого, среднего и крупного диаметров. Исследования показали, что протекание при применении одинарной прокладки не многим больше, чем при применении двойной прокладки. Рассматривая данную проблему с точки зрения распределения протеканий, утечки обычно проявляются в основном теле тубинга и его швах, когда обнаруживаются серьезные смещения. Поэтому при грамотном проектировании формы сечения прокладки применяются подходящие для лучшей герметизации материалы, обеспечивающие самогерметизацию тела тубинга. При строгом контроле качества сборки тубинга, обычно не применяют двойную защиту, кроме случаев, где наблюдается высокое давление воды на туннель (внешний диаметр у таких туннелей больше 15 м). Что касается туннелей, в которых применяются двойные уплотнительные прокладки, рекомендуется устанавливать герметичное отверстие в промежутке между уплотнительными прокладками. В таком случае, при обнаружении протечек во время эксплуатации, отверстие можно будет залить герметическим составом, герметик запечатает точку утечки в закрытой среде.

#### **4.2.2. Конструкция прокладки**

Гидроизоляция прокладки зависит от ее размера и формы. При проектировании прокладки необходимо изучить следующие аспекты.

##### *1) Принципы проектирования прокладок*

Величина контактного напряжения зависит от упругости прокладки. Для обеспечения соответствующей силы упругого восстановления необходимо установить требуемый объем прокладки. При чрезмерном увеличении ее объема могут возникнуть трудности при сборке тубингов. При проектировании прокладки для герметизации тубингов следует учитывать следующие результаты китайских и международных инженерных и материаловедческих исследований:

(1) Для обеспечения краткосрочной влагостойкости контактное напряжение прокладки должно быть больше расчетного давления воды. Для обеспечения длительной влагостойкости контактное напряжение не должно быть меньше расчетного давления воды. Должно обеспечивать достаточный коэффициент надежности водоизоляции, на стыке не допускаться протечки стыков.

(2) Соответствующий объем прокладки может обеспечить достаточное контактное напряжение и удовлетворять эффекту гидроизоляции швов щита. Превышение объема может вызвать увеличение давления и концентрации напряжения при сборке;

(3) При проектировании следует учитывать размер раскрытия и забега.

(4) Давление домкратов и действующая сила при сборке тубингов не должны приводить к повреждению торца и угловой части тубинга. Когда выполнены условия гидроизоляции, необходимо сократить давление на прокладку (общее давление при полном вдавливании уплотнительной прокладки в пазы тубинга), чтобы обеспечить удобство строительства;

(5) Необходимо учитывать долгосрочную релаксацию напряжения и стрелу остаточной деформации.

##### *2) Определение размера раскрытия и забега стыков тубингов*

При производстве, монтаже и эксплуатации тюбингов проходческого щита на стыке неизбежно возникнут разбеги раскрытия. Его прямые факторы воздействия следующие:

- (1) погрешность при производстве тюбинга:  $\pm 2$  мм;
- (2) погрешность при установке тюбинга:  $\pm 2$  мм;
- (3) толщина буферного материала: 1~2 мм;
- (4) погрешность в работе проходческого щита:  $\pm 5$  мм (кольцевой стык);
- (5) восприятие продольных усилий, создаваемых щитом во время передвижения:  $\pm 2$  мм;
- (6) человеческий фактор, воздействие окружающей среды:  $\pm 2$  мм;
- (7) ошибка измерения площадки контакта прокладки:  $\pm 1$  мм.

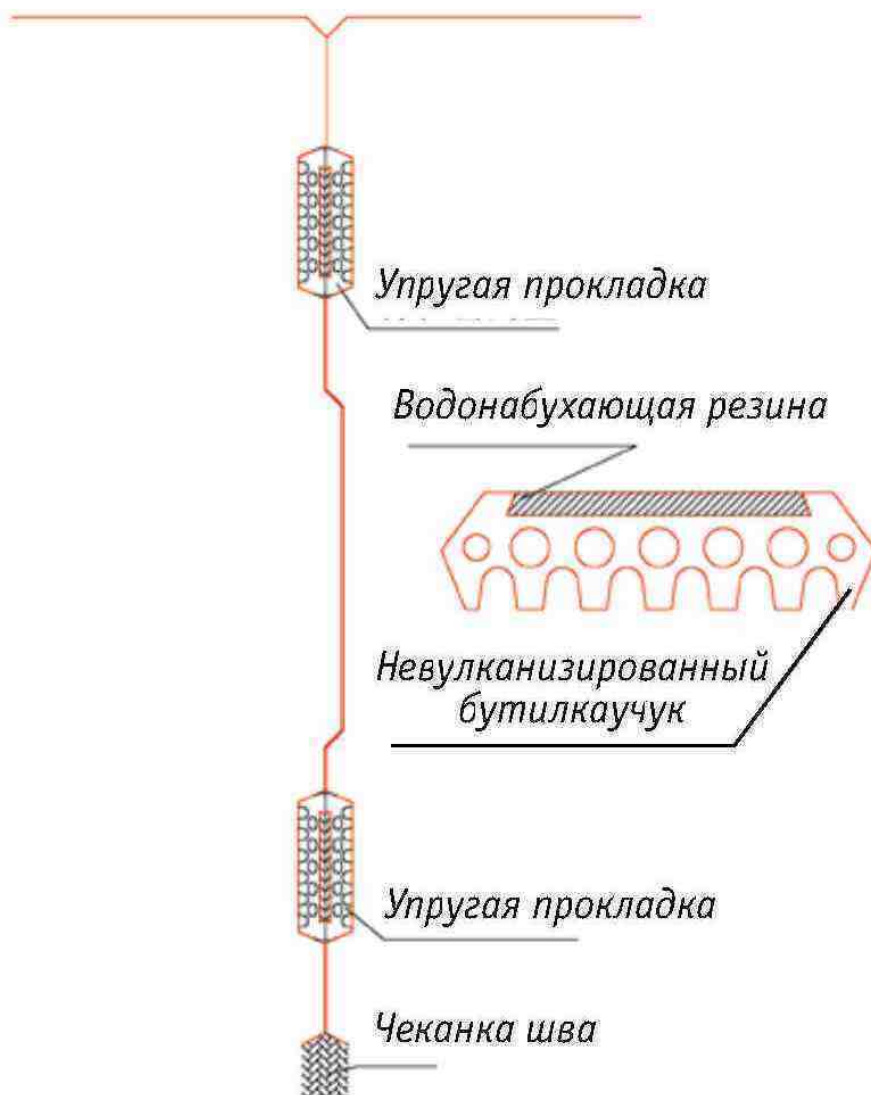


Рис. 4-11. Две уплотнительные прокладки для гидроизоляции

Под влиянием перечисленных факторов накапливающий максимальный размер раскрытия стыков может составить 8 мм, разбег – 15 мм. В соответствующей литературе также приводится полуаналитический метод расчета допустимого размера раскрытия стыков при определенном давлении воды:

$$\Delta \leq \frac{BD}{\rho_{\min} - 0.5D} + \Delta_0 + \Delta_s$$

(4-7),

где:  $\Delta$  – допустимый размер раскрытия кольцевых стыков с гидроизолирующими упругими прокладками при определенном давлении воды (мм);

$\rho_{\min}$  – минимальный радиус кривизны продольного прогиба туннеля (мм);

$D$  – внешний диаметр обделки (мм);

$B$  – ширина тубинга (мм);

$\Delta_0$  – вероятный размер кольцевого стыка при производстве и монтаже (мм);

$\Delta_s$  – величина последующего раскрытия стыков (мм).

3) Коэффициент надежности и показатель водонепроницаемости

Согласно соответствующей литературе о системе гидроизоляции требования по водонепроницаемости выполняются при коэффициенте контактного напряжения и расчетного давления воды больше 1.15. На практике рекомендуется использовать коэффициент в диапазоне 1.2 ~ 1.4. При увеличении или уменьшении давления воды коэффициент соответственно изменяется.

Показатель водонепроницаемости (то есть величина контактного напряжения) рассчитывается, как коэффициент надежности  $\times$  расчетное давление воды  $\div$  коэффициент остаточного напряжения прокладки после снижения напряжения и износа. Выражение выглядит следующим образом:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma > \frac{K\sigma_w}{\gamma} \\ \sigma > K\sigma_w \end{array} \right.$$

(4-8),

где  $\sigma$  – расчетный показатель водонепроницаемости (контактное напряжение прокладки), учитывающий величину разбега и раскрытия стыков тубинга;

$K$  – коэффициент надежности гидроизоляции;

$\sigma_w$  – расчетное теоретическое давление воды;

$\gamma$  – коэффициент остаточного напряжения прокладки при снижении напряжения и износе материала.

Например, согласно статистике у вулканизированного этиленпропилендиенового каучука коэффициент остаточного напряжения в течение 100 лет составляет 65%. Эти данные можно учитывать на начальном этапе проектирования, но на этапе реализации следует опираться на результаты испытаний.

#### 4) Проектирование размера и формы прокладки

Проектирование размера и формы прокладки включает непрерывный процесс оптимизации. На ход разработки влияют два фактора:

1. Достижение расчетных требований по гидроизоляции в самых неблагоприятных условиях работы.

2. Максимальное снижение давления при сборке с соблюдением условий водонепроницаемости. Это связано с тем, что увеличение усилия прижатия тюбингов, по меньшей мере, может повлиять на темп строительных работ. В худшем случае это может привести к выдавливанию или обрыванию прокладки, а также трещинам в бетоне тюбинга, что нарушит гидроизоляцию.

В настоящее время в Китае и других странах отмечается недостаток теоретических данных о проектировании размера и формы прокладки. В ходе испытаний трудно получить данные о величине и распределении внутреннего и контактного напряжения прокладки. Поэтому для проектирования используют цифровое моделирование с применением данных конечных элементов. При получении данных о величине и распределении внутреннего и контактного напряжения определяют предварительные размеры и форму прокладки путем соотношения величины напряжения. Для подтверждения эффективности гидроизоляции позже проводят опыты с нагнетанием воды.

Ключи проектирования размера и формы уплотнительной прокладки:

(1) Ширина прокладки Ширина прокладки влияет на путь протекания воды под давлением. Согласно международному опыту для соответствия требованиям гидроизоляции ширина контактной площадки прокладки должна составлять три степени наибольшей величины уступа по следующей формуле:

$$b = 3s$$

(4-9),

где  $b$  – ширина прокладки (мм);

$s$  – величина наибольшего разбега (мм).

Например, при наибольшей величине разбега 15 мм прокладка шириной 45 мм будет соответствовать требованиям гидроизоляции. Кроме того, в практическом сравнении при соединении кольцевых и продольных стыков тюбингов по типу «шип – паз» образование уступа незначительно. После полного соединения двух сторон стыка при использовании соединения типа «шип – паз» ширина прокладки меньше, чем без такого соединения в аналогичных условиях. Таким образом, для стыков тюбингов в проходческом щите большого диаметра рекомендуется использовать соединение типа «шип – паз».

#### (2) Высота прокладки

При расчете высоты прокладки следует учитывать максимальный размер раскрытия стыков, а также снижение напряжения прокладки, ослабление и износ материала. Форма прокладки должна подходить к форме пазов на торцах тюбингов (выемка, полость и др.). Глубина паза и высота прокладки рассчитывается по следующей формуле (обозначения, использованные в формуле, показаны на *рис. 4-12*):



Рис. 4-12. Схема формы и пазов уплотнительной прокладки

$$\left\{ \begin{aligned} \varepsilon_{\max} &= \frac{h - d}{h} \\ \varepsilon_{\min} &= \frac{h - d - \frac{\Delta}{2}}{h} \end{aligned} \right.$$

$$E\varepsilon_{\min} = \sigma > \frac{K\sigma_w}{\gamma}$$

(4-10),

где:  $\varepsilon_{\max}$  – максимальный коэффициент сжатия уплотнительной прокладки, при котором размер зазора составляет 0 мм. После проведения расчетов и испытаний его значение обычно составляет не менее 40%;

$\varepsilon_{\min}$  – минимальный коэффициент сжатия уплотнительной прокладки с учетом размера уступа и раскрытия стыков. Его значение обычно составляет не менее 30%;

$\Delta$  – допустимое раскрытие стыков;

$d$  – глубина паза;

$h$  – высота уплотнительной прокладки;

$E$  – модуль упругости уплотнительной прокладки.

На рис. 4-13 показана кривая деформации сжатия уплотнительной прокладки. До определенной степени увеличение сжатия приводит к нелинейному увеличению давления. Далее небольшое усиление сжатия может привести к экспонентному росту давления. Таким обра-

зом, не следует устанавливать слишком большой показатель максимального сжатия упругой уплотнительной прокладки. В процессе монтажа степень сжатия уплотнительной прокладки не должна превышать ее показатель при максимальном коэффициенте сжатия. Превышение силы сжатия может привести к ускорению износа материала, усилению релаксации напряжения, тем самым повлияв на срок службы уплотнительной прокладки. Также нельзя допускать снижения степени сжатия ниже значения при минимальном коэффициенте сжатия, что может привести к недостаточному сопротивлению расчетному давлению воды и протечкам в туннеле.

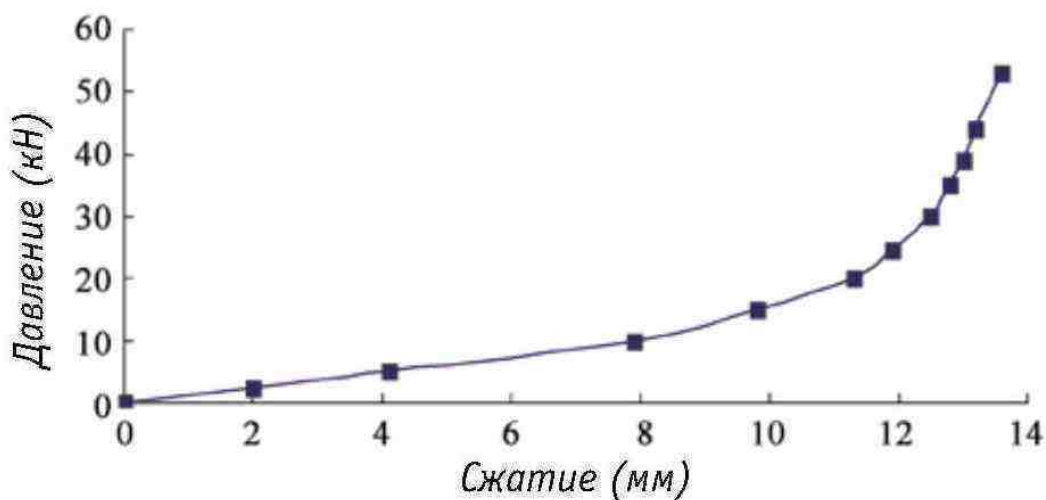


Рис. 4-13. Кривая деформации сжатия резиновой уплотнительной прокладки

### (3) Проектирование формы уплотнительной прокладки

Сжимаемость уплотнительной прокладки зависит от ее формы и строения. При проектировании формы уплотнительной прокладки основными вопросами являются:

1. Контроль деформируемости внутренних отверстий;
2. Расчет концентрации напряжения и пластичности в местах уплотнительной прокладки, ослабленных формированием отверстий;
3. Расположение отверстий с учетом требуемого контактного напряжения при сжатии уплотнительной прокладки и давления при монтаже;
4. Определение количества и расположения отверстий на основании результатов теоретических расчетов распределения и величины контактного напряжения при максимальном разmere разбега и раскрытия стыков;
5. Определение концентрации напряжения при различных вариантах расположения отверстий;
6. Расчет влияния долгосрочной релаксации напряжения и ползучести на гидроизоляцию.

В последние 10 лет в Китае проводилось большое количество исследований о количестве и размере отверстий в прокладках, форме отверстий и прокладки (зубчатая или незубчатая). Однако построение теоретической системы еще не завершено, и при проектировании в основном используют имеющийся инженерный опыт, цифровое моделирование и результаты практических испытаний. Наиболее часто используемые формы уплотнительной прокладок в Китае представлены на рис. 4-14.

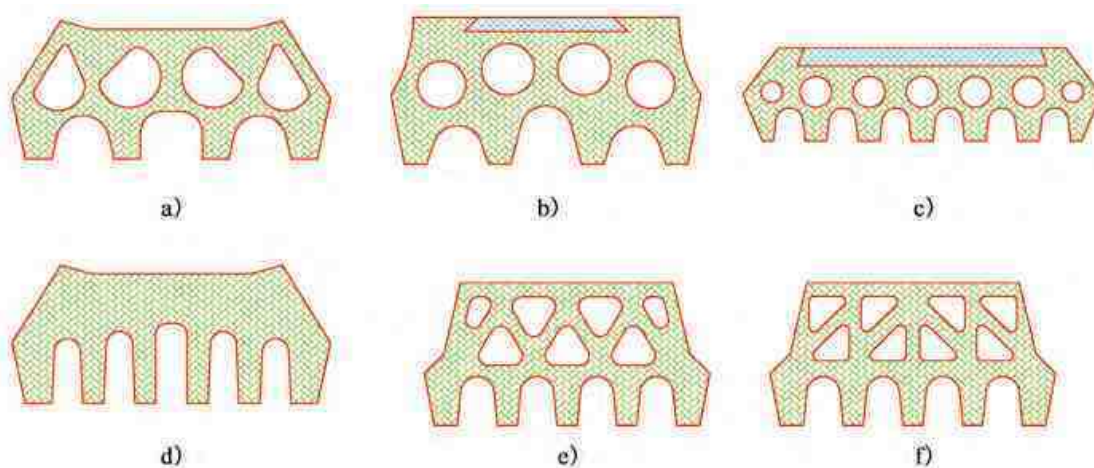


Рис. 4-14. Наиболее часто используемые формы уплотнительных прокладок в Китае

(4) Проектирование размеров уплотнительного паза Уплотнительную прокладку следует полностью вдавить в уплотнительный паз на торцах тубингов. Согласно «Стандартам гидроизоляции при проведении подземных строительных работ» (GB50108), если раскрытие стыков составляет 0, площадь поперечного сечения уплотнительного паза должна быть больше или равна площади поперечного сечения уплотнительной прокладки, что выражается следующей формулой:

$$A = (1 - 1.5) A_0$$

(4-11),

где  $A$  – площадь поперечного сечения паза;

$A_0$  – площадь поперечного сечения прокладки.

При проектировании уплотнительного паза размеры не должны быть слишком большими. Слишком большой уплотнительный паз снижает действие бокового ограничителя, и боковая поверхность уплотнительной прокладки деформируется, что снижает контактное напряжение уплотнительной прокладки между стыками, и не обеспечивает гидроизоляционный эффект. В то же время паз не должен быть слишком маленьким, как  $A/A_0 < 1.0$ . Чтобы достичь требуемого уровня гидроизоляции необходимо увеличить силу давления при монтаже тубингов. Однако это может сильно повлиять на точность сборки тубингов, а также увеличивает энергопотребление, усложняет сборку и может привести к выдавливанию уплотнительных прокладок из паза, пластической деформации выдавленной части уплотнительной прокладки, формированию канала протечки и потере герметичности соединения.

#### 4.2.3. Выбор материала уплотнительной прокладки

В качестве материала уплотнительной прокладки обычно используют клейкий водостойкий невулканизированный бутилкаучук, самовосстанавливающийся этиленпропилендиеновый каучук и водонабухающую резину.

Невулканизированный бутилкаучук является распространенным гидроизолирующим материалом, но по причине высокой цены и уступающей этиленпропилендиеновому каучуку термостойкости в настоящее время редко используется с тенденцией к постепенному исключению из работы.

Водонабухающая резина в основном используется в Японии, Южной Корее и других азиатских странах. В Китае также часто используется в качестве гидроизолирующего материала в проходческих щитах. По сравнению с упругой уплотнительной прокладкой гидроизолирующая уплотнительная прокладка из водонабухающей резины применяется в Китае и других странах недавно. Она относится к сравнительно новой продукции. Направление ее разбухания, степень разбухания и долговечность вызывают сомнения. Кроме того, различия в характеристиках гигроскопичности полимеров и других набухающих материалов, снижение долгосрочной прочности и деформационных свойств хлоропренового каучука и других материалов основы после набухания, а также уменьшение распада и сопротивления давлению и другие причины приводят к тому, что при практическом применении материалов из водонабухающей резины сложно достигнуть ожидаемого результата. Постепенно этот материал все чаще используют в качестве вспомогательного материала.

Этиленпропилендиеновый каучук в странах Европы и Америки используется около пятидесяти – шестидесяти лет. За последние десять лет в Китае также постепенно увеличилось его применение. Исследование его характеристик долгосрочного напряжения и долговечности показали хорошие результаты, и он стал предпочтительным материалом для гидроизоляции стыков в проходческих щитах. В последние годы для проходческих щитов большого диаметра часто используется комбинированная упругая уплотнительная прокладка из этиленпропилендиенового каучука и водонабухающей резины. Однако в ходе испытаний неоднократно отмечалось явление выдавливания водонабухающей резины с поверхности уплотнительной прокладки. Причиной является существующие в настоящее время технологии производства резины. Большинство производителей отдельно вулканизируют этиленпропилендиеновый каучук и водонабухающую резину, а затем ручным способом вставляют водонабухающую резину в этиленпропилендиеновый каучук, что не объединяет их в одно целое. Таким образом, водонабухающая резина при объемном расширении отделяется от этиленпропилендиенового каучука. В настоящее время в Китае и других странах существуют производители, которые разработали технологию совместной вулканизации этиленпропилендиенового каучука и водонабухающей резины, что обеспечивает целостность комбинированного материала. Возможно, такой тип материалов в будущем будет широко использоваться.

### **4.3. ОДНО- И ДВУХСЛОЙНАЯ ОБДЕЛКА ПРОХОДЧЕСКИХ ЩИТОВ**

В отрасли продолжается постоянная дискуссия об использовании одно- или двухслойной обделки для туннелей. При болтовом соединении проходческий щит создает гибкую систему. Если использовать двухслойную обделку, то из-за ровной и гладкой внутренней поверхности тюбингов два слоя с трудом объединяются в одну структуру и соединяются между собой, а также создают в целом больше несущего давления.

С точки зрения координации деформации вторичная обделка невозможна аналогичной конструкции тюбингов. Он создает большое количество деформационного шва, что приведет к координации деформации структуры тюбингов и концентрации напряжения. Кроме того, учитывая задачи по сокращению сечения туннеля и финансовых затрат на строительство, сложно оставить второй слой соответствующим требованиям к его толщине для выдерживания давления. При рассмотрении существующих туннелей с двухслойной обделкой можно отметить, что у большинства из них толщина второго слоя составляет 200 – 300 мм. Такой толщины недостаточно для выдерживания давления воды, которое возникнет в случае протекания конструкции тюбингов. Если возникнет концентрация напряжения и давления воды, в более тонком вто-

ром слое могут появиться трещины и протечки. Второй слой в подводном туннеле токийского залива в Японии, установленном с целью гидроизоляции, малоэффективен.

За исключением водопроводных туннелей (несущее давление и использование пространства внутри автомобильных туннелей отличается) в Китае и других странах большинство проходческих щитов используют один слой обделки с тюбингами в качестве постоянной конструкции. В случае возникновения локальной проблемы в тюбинге в настоящее время широко используется метод армирования стальным кольцом, что позволяет избежать полного нарушения устойчивости из-за излишней деформации. Распространенным методом устранения серьезных протеканий является укрепление конструкции тюбингов, затем их наружная цементация, что создает упрочняющее кольцо и водонепроницаемый слой, что снижает коэффициент проницаемости слоя, усиливает сдерживающую способность конструкции, повышает физико-механические характеристики слоя, а также снижает прямую внешнюю нагрузку на тюбинги и контролирует деформацию. Кроме того, организуется дренажная система и централизованный выброс воды.

## **ГЛАВА 5. ПЛАТФОРМА БОЛЬШИХ ДАННЫХ ЩИТОВОЙ ПРОХОДКИ**

Проходческий щит, известный как «царь инженерных машин» в мире строительных технологий, является самым прогрессивным модернизированным оборудованием для строительства туннелей и обладает всеми характеристиками новейшей техники, такими как автоматизация, цифровизация и использование искусственного интеллекта, которые позволяют получать данные о щитовой проходке. Традиционно под такими данными принято понимать цифровые сигналы и сведения о цифровом управлении туннелепроходческим комплексом. Данные о щитовой проходке, в основном, включают: показатели контрольного переключателя, его аналоговые переменные и измерения импульса, а также показатели переключателя фаз, его аналоговые переменные и измерения импульса и т. д. Данные о щитовой проходке нужны для контроля работы оборудования, они отображают состояние техники в режиме реального времени, тем самым облегчая взаимодействие человека с компьютером и процесс поиска неисправностей.

В последние годы с развитием информационных технологий, особенно интернета, всемирной компьютерной сети, GPS, облачного хранилища, облачных вычислений, искусственного интеллекта и др. метод щитовой проходки стал автоматизированным, и современные проходческие щиты стали умнее. В настоящее время ТПК представляет собой полностью компьютерный терминал, функционирующий в сети интернет. ТПК совместно с другими строительными инструментами подключены к базе данных, в которой хранится информация о инженерно-геологических условиях строительства туннеля проходческими щитами, строительной конструкции, оседании поверхности земли, координатах направления туннеля, организации строительства, ходе строительства и др. Все это, в общем и целом, формирует большие данные. Таким образом, наступила эра больших данных щитовой проходки.

### **5.1. РОЛЬ И ЗНАЧЕНИЕ БОЛЬШИХ ДАННЫХ ЩИТОВОЙ ПРОХОДКИ**

Мировая экономика быстро подстраивается под отрасль сетевых информационных технологий, которая уже играет важную роль в экономической деятельности. Китай должен воспользоваться этой исторической возможностью, чтобы с помощью информационных технологий создать правильный импульс и направить его на развитие новых разработок. Необходимо увеличивать инвестиции, укреплять строительство информационной инфраструктуры, способствовать глубокой интеграции интернета в сектор реальной экономики, развивать цифровые технологии и использование ИИ в традиционных отраслях, приумножать и укреплять цифровую экономику и расширять новые возможности для экономического развития. 36-я встреча Генерального секретаря Си Цзиньпина и Политбюро ЦК КПК была посвящена теме развития и укрепления цифровой экономики, тем самым было определено ведущее направление – глубокая интеграция интернета в сектор реальной экономики и расширение нового пространства для экономического развития, что также выдвинуло новые требования к щитовому методу.

(1) Создание платформы больших данных щитовой проходки имеет большое значение для развития промышленного производства Китая и реализации цели «головой подпирать небо, ногами стоять на земле».

«План действий по содействию развитию больших данных», изданный Государственным советом (далее именуемый «План»), устанавливает развитие больших данных в качестве национальной стратегии. По итогам пятого пленарного заседания ЦК КПК 18-го созыва было предложено реализовать план «Интернет +», развивать экономику совместного использования и осуществить национальную стратегию о больших данных. Активно развивать большие данные в промышленности и новых отраслях, а также с помощью больших данных содействовать глу-

бокой интеграции информатизации и индустриализации, тем самым продвигая использование беспроводных технологий, сети и искусственного интеллекта в производственной отрасли, которые становятся ведущими направлениями в промышленной сфере. Бесспорно, промышленность является главным фокусом внимания больших данных, а большие данные в промышленности играют большую роль в производственной цепочке и увеличивают добавленную стоимость промышленного производства. Конечная цель больших данных заключается в развитии промышленности, а также модернизации промышленных предприятий. Чтобы успешно реализовать стратегию «Сделано в Китае-2025», китайские промышленные компании должны придерживаться двух задач: «головой подпирать небо» – освоить большие данные в промышленности и полностью наладить интеллектуальное производство Китая в высокотехнологичных секторах; «ногами стоять на земле» – освоить большие данные в китайской производственной отрасли, а также за счет использования больших данных повысить эффективность китайских промышленных предприятий, сократить расходы и энергопотребление и вывести качество китайской продукции на новый уровень. Чтобы реализовать цель «головой подпирать небо, ногами стоять на земле», Китай должен привлекать таланты, знания и инструменты. В настоящее время в США не хватает около 190 тыс. специалистов по киберфизическим системам, в Китае нехватка талантов ощущается еще больше. Кроме того, среди неотложных задач стоит необходимость получения дополнительных знаний о больших данных и обновления инструментов. Большие данные щитовой проходки являются одним из многочисленных интеллектуальных продуктов и национальным производственно-стратегическим продуктом. Сбор больших данных для щитового метода – важная составляющая часть использования больших данных в промышленности. Необходимо уделять особое внимание сбору больших данных, поскольку это имеет важное значение для развития промышленного производства Китая и реализации цели «головой подпирать небо, ногами стоять на земле».

(2) Создание платформы больших данных щитовой проходки является предпосылкой для внедрения ИИ в работу оборудования и строительный процесс.

Благодаря быстрому развитию информационных и интернет технологий, строительное оборудование и технологии постоянно совершенствуются. Щитовая проходка является важным методом проведения подземных строительно-монтажных работ. Оборудование щитовой проходки прошло эпоху автоматизации и вошло в новую цифровую эру. С развитием информационных и интернет технологий традиционные методы сбора, хранения и сводки строительных данных не удовлетворяют темпам технического прогресса и нуждам строительства. В целях содействия технологическому развитию щитового метода сбор, хранение и анализ данных стали главными направлениями интеллектуализации в производстве и строительстве.

(3) Строительство щитовым методом быстро развивается, оборудование для щитовой проходки используется повсеместно, что приводит к очень важной задаче – реализовать централизованное управление и единое планирование.

В связи с устойчивым развитием метрополитенов в Китае, все более осваивается подземное пространство городов и строятся новые туннели, при этом основным методом строительства является щитовая проходка. Возьмем, к примеру, Китайскую корпорацию железнодорожных туннелей. В настоящее время компании в общей сложности принадлежит более 80 проходческих щитов и ТПК, в том числе более 50 проходческих щитов с грунтопригрузом, 15 жидкошламовых проходческих щитов, 12 ТПК и 2 проходческих прямоугольных щита. Таким образом, в компании используются практически все известные строительные модели. Что касается строительно-технических объектов, это в основном железные дороги, шоссе, городской транспорт, ГЭС и др. объекты на востоке, юге, севере, северо-востоке, юго-западе и северо-западе Китая, а также в Израиле, Сингапуре и Малайзии и некоторых других странах. Широкое региональное распространение проходческих щитов создает трудности для управления оборудованием и строительством. Создание единой системы, которая сможет стабильно

и эффективно осуществлять единый мониторинг ТПК в различных регионах и облегчит контроль строительства на местах, принятие управленческих решений и сбор строительно-технических данных, а также обмен информацией, регулирование всестороннего планирования и интегрированного управления, является первостепенной задачей современного предприятия.

(4) Сбор и анализ данных для щитовой проходки, эффективное снижение рисков в строительстве, комплексный контроль и оценка рисков.

Феномен «информационных островов» широко распространен в производстве оборудования для щитовой проходки и в строительной отрасли в целом. Ведется множество подземных и скрытых строительных работ, существуют разные неизвестные риски и непредсказуемые ошибки оборудования. Таким образом, технология применения анализа больших данных может собирать данные о строительных работах и оборудовании в разных областях и регионах и затем анализировать эти данные в интерактивном режиме. Совместный обмен большими данными щитового метода стал реальностью и принес большой вклад в развитие данной отрасли.

Тот, кто может контролировать данные, может контролировать рынок. Анализ и обработка больших данных очень важны для предприятий. Благодаря сбору и анализу данных предприятие получает информацию о его развитии, а затем прогнозирует потребности потребителей и рынка и проводит более точный анализ принятия решений. Внедрение передовых математических методов для проведения сбора и анализа больших данных при щитовом методе может не только повысить эффективность данного метода, снизить риски строительства и принести пользу экологическому развитию индустрии, но также восполнить пробелы в отношении автоматизации и интеллектуализации управления проходческими щитами и улучшить конкурентоспособность оборудования на международном рынке. Для строительных компаний применение метода управления большими данными может повысить уровень корпоративного менеджмента и эффективность принятия решений, снизить вероятность выхода из строя проходческих щитов, увеличить коэффициент использования и срок службы оборудования, а также снизить затраты на строительство.

(5) Стандартизация больших данных щитового метода станет предпосылкой для будущего развития платформы анализа данных и принесет успех отрасли.

Количественная оценка и совместное использование данных является основой больших данных. Анализ больших данных щитового метода включает сбор данных о производителях, инженерно-геологических условиях, моделях ТПК, данные о строительстве и местоположении, а также их упорядочивание для создания единого стандарта данных для метода щитовой проходки. Создается словарь данных для щитового метода. Сведения о строительстве, состоянии оборудования, неисправностях и научных исследованиях записываются на стандартизированной национальной платформе больших данных щитового метода, они накапливаются и используются в открытом доступе. Все это может принести успех отрасли.

## **5.2. КОНЦЕПЦИЯ И СОЗДАНИЕ ПЛАТФОРМЫ БОЛЬШИХ ДАННЫХ**

Создание единой платформы для использования больших данных щитовой проходки должно быть ориентировано на щитовой метод и обеспечивать доступ к данным о производителях, инженерно-геологических условиях, моделях ТПК и работах на объектах. Строительство платформы больших данных щитовой проходки должно соответствовать следующим требованиям:

(1) Платформа должна устанавливаться на строительной площадке щитовой проходки, обслуживать данную проектную площадку и осуществлять контроль и оценку рисков проекта;

(2) Создание платформы предназначено для отрасли технологии проходческих щитов и проходки, необходимо построить связующее звено между сферой оснащения проходческими

щитами и сферой щитовой проходки, чтобы реально решить проблему «адаптации» оборудования;

(3) Создание платформы должно быть направлено на улучшение принятия управленческих решений, реализацию информационного обмена и комплексных сфер услуг, и усиление влияния китайских проходческих щитов на международной арене;

(4) Платформа должна создаваться при соблюдении нормативно-правовых принципов, и быть открытой, прогрессивной, практичной, надежной, гибкой и оперативной, безопасной, экономичной, точной, простой в использовании и управлении, и работать в режиме реального времени.

Структура платформы больших данных для щитовой проходки должна включать уровень аппаратных ресурсов, уровень управления системой, центральный уровень, список пользователей и администраторов и т. д. Базовый интерфейс платформы показан на *рис. 5-1*. Ядром базы данных является центральный уровень, который имеет платформу сбора больших данных щитовой проходки, платформу управления большими данными при проектировании туннелей, платформу моделирования вычислений и интеллектуальную систему поддержки принятия решений, платформу контроля и мониторинга строительства туннелей и платформу публикации больших данных.

#### **5.2.1. Платформа сбора больших данных щитовой проходки**

Платформа сбора больших данных щитовой проходки использует интернет и мобильные интернет-технологии для подключения различных инструментов обнаружения и мониторинга на строительной площадке, чтобы достичь всестороннего понимания инженерно-геологических условий проектной зоны и рабочего состояния строительной техники; хранит проектную документацию технического персонала и запись операций на строительных работах в режиме реального времени; осуществляет мгновенную передачу данных в центр хранения и обработки данных, а также обработку и хранение данных в соответствии с инженерными стандартами, что обеспечивает своевременную и надежную информацию для различных специалистов, которые совместно работают над проектом.

Практически все современные проходческие щиты и различные контрольно-измерительные приборы оснащены интеллектуальными сенсорными компонентами или специализированными ЭВМ и работают совместно на базе интернета вещей и мобильного интернета. Также необходимо усилить исследования и разработки в области высокоточного и высокопроизводительного позиционирования для проектирования туннеля, обнаружения деформаций, усовершенствовать техники измерения и описания грунтовых поверхностей вблизи забоя, чтобы обеспечить надежную техническую поддержку для точного прогнозирования инженерно-геологических условий вблизи забоя.



Рис. 5-1. Интерфейс платформы больших данных щитовой проходки

### 5.2.2. Платформа управления большими данными при проектировании туннелей

Платформа управления большими данными при проектировании туннелей должна иметь интегрированную базу данных о проектировании туннелей, включая базу данных проходческих щитов и оборудования, базу данных инженерных проектов, базу данных о строительных площадках, динамическую базу данных по анализу строительства и использованию ИИ в принятии решений и т. д. А также необходимо создать систему управления базами данных для удаленных и разнородных операций с данными, использующую облачные вычисления и подключенной к сети интернет. В состав большой группы баз данных по проектированию туннелей должны войти:

(1) Основная группа баз данных: база данных инженерно-геологических условий, база данных по скалистым, глинистым и песчано-гравийным грунтам, база данных нормативно-технических документов, база данных по теоретическим основам проектирования туннелей и т. д.;

(2) Группа баз данных строительных материалов и связанных элементов конструкции: база данных строительных материалов, база данных механических свойств типичных элементов конструкции (например, тубингов);

(3) База данных строительной техники и оборудования: можно создать базу данных строительной техники и оборудования по классификации их функций, например, базу данных проходческих щитов и их комплектующих (резцовых головок, режущих инструментов), базу данных контрольно-измерительных приборов и т. д.;

(4) Группа баз данных по испытанию механических свойств материалов и изделий, онлайн-мониторингу и анализу;

(5) База данных дел по туннельным работам: в соответствии с инженерно-геологическими условиями можно создать отдельные базы данных дел по строительству для скалистого, песчано-гравийного и глинистого грунтов (с высоким и низким содержанием воды). Для каждой категории можно еще вводить подразделы, также могут быть созданы многоуровневые базы данных дел по строительству;

(6) Группа баз данных о строительных площадках: базы по сбору и хранению информации о строительных площадках, анализу строительных работ и оценке принятия решений;

(7) Группа динамических баз данных по анализу строительства и использованию ИИ в принятии решений: динамическая база данных, которая предоставляет высокую производительность работы с большими данными для инженерного проектирования, расчетов, анализа и работы программного обеспечения для принятия решений с использованием ИИ;

(8) Библиотека индексов каталогов: библиотека индексов каталогов локальной базы данных, а также общей базы данных в интернете.

### **5.2.3. Платформа моделирования вычислений и интеллектуальная система поддержки принятия решений**

Будь то проектирование туннелей, строительство или оценка безопасности, необходимо задействовать высокопроизводительный вычислительный анализ и аналоговое моделирование, основываясь на получении новых данных и принятии решений с использованием ИИ. Вычислительное моделирование и платформа принятия решений на основе ИИ обеспечивают высокую производительность вычислительных возможностей за счет высокоскоростных алгоритмов принятия решений и анализа информации при помощи ИИ, а также функциональных подсистем. Через платформу принятия решений на основе ИИ реализуется геологическая картина строительных работ в режиме реального времени, цифровое моделирование проходки щитов осуществляется с помощью облачных вычислений, и в результате показываются параметры проходки туннеля под интеллигентными параметрами.

### **5.2.4. Платформа совместимой работы и мониторинга строительства туннелей щитовым методом**

Платформа совместимой работы и мониторинга строительства туннелей щитовым методом в основном состоит из подсистем контроля и мониторинга строительства туннелей в скальных, глинистых и песчано-гравийных грунтах, а также сложного строительства туннелей (проходящих через существующие туннели и здания). На *рис. 5-2* приведен пример подсистемы контроля и мониторинга строительства туннелей в скальных грунтах.

### **5.2.5. Платформа публикации больших данных**

Платформа публикации больших данных в соответствии с техническими спецификациями управления данным собирает, систематизирует и формирует единую общедоступную базу данных, которую пользователи могут запрашивать в режиме реального времени. Общедоступная информация включает в себя: основные правила и положения системы, базу данных статистических отчетов, группу основных баз данных, базу данных по теоретическим основам проектирования туннелей и т. д. Необходимо классифицировать и сформулировать стандарты и нормы сбора данных, установить правила и системы для хранения данных и справочного сервиса, а также систем управления функционированием.

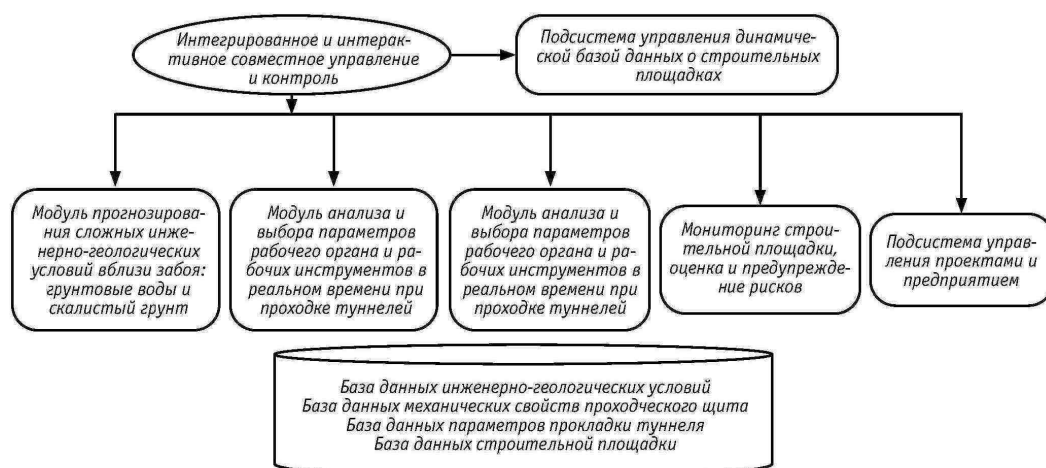


Рис. 5-2. Подсистема контроля и мониторинга строительства туннелей в скальных грунтах

## **ВТОРОЙ РАЗДЕЛ. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ**

Данный раздел включает в себя 5 глав: «Система проходческих щитов и ключевые компоненты», «Защитовой комплекс и вспомогательное оборудование», «Система удаленного управления данными», «Производство и сборка проходческого щита», «Обновление проходческого щита». В данном разделе дается описание функций оборудования проходческих щитов, принципы работы, конструкция, основные пункты конструкции, ключевые технологии и тенденции развития, технология изготовления, заводская сборка и наладка оборудования. Это поможет специалистам, работающим с проходческими щитами системному пониманию устройства проходческих щитов, технологии производства и обновления оборудования. Это может быть важным руководством и справочным материалом по использованию и управлению оборудованием проходческих щитов.

**Глава 6.** Система проходческих щитов и ключевые компоненты

**Глава 7.** Защитовой комплекс и вспомогательное оборудование

**Глава 8.** Система удаленного управления данными

**Глава 9.** Производство и сборка проходческого щита

**Глава 10.** Обновление проходческого щита

## **ГЛАВА 6. СИСТЕМА ПРОХОДЧЕСКИХ ЩИТОВ И КЛЮЧЕВЫЕ КОМПОНЕНТЫ**

Проходческие щиты являются эффективным средством для проходки туннеля, имеют большое значение при сооружении железнодорожных и автомобильных туннелей, городского метро, коммуникационных туннелей, подземных переходов, штрека угольной шахты, подводящих туннелей и других инженерных объектов. Развитие технологий проходческих щитов в Китае за более 60 лет прошла этапы рассвета, инновации и превосходства и сформировала комплексную техническую систему. В настоящее время в Китае уже реализован полный цикл производства проходческих щитов, но существует определенное отставание ключевых компонентов и системы от международных современных передовых технологий. В данной главе приводится описание системы проходческих щитов и восьми ключевых компонентов с точки зрения функций основных систем, основных технических аспектов, тенденции развития и передовые технологии проходческих щитов.

### **6.1. РЕЗЦЫ РЕЗЦОВОЙ ГОЛОВКИ**

#### **6.1.1. Виды и формы резцов**

Резцы, используемые в проходческих щитах, в основном делятся на дробящие и вспомогательные резцы. Название дробящих резцов главным образом связано с их механическим действием на породы. Они подразделяются на три вида: вращающиеся фрезы (шарошки), скалывающие (пластинчатые резцы), прорезывающие (стержневые). Вспомогательные резцы названы по их основной функции: зачищающие или расширяющие резцы. Все виды представлены на *рис. 6-1*.

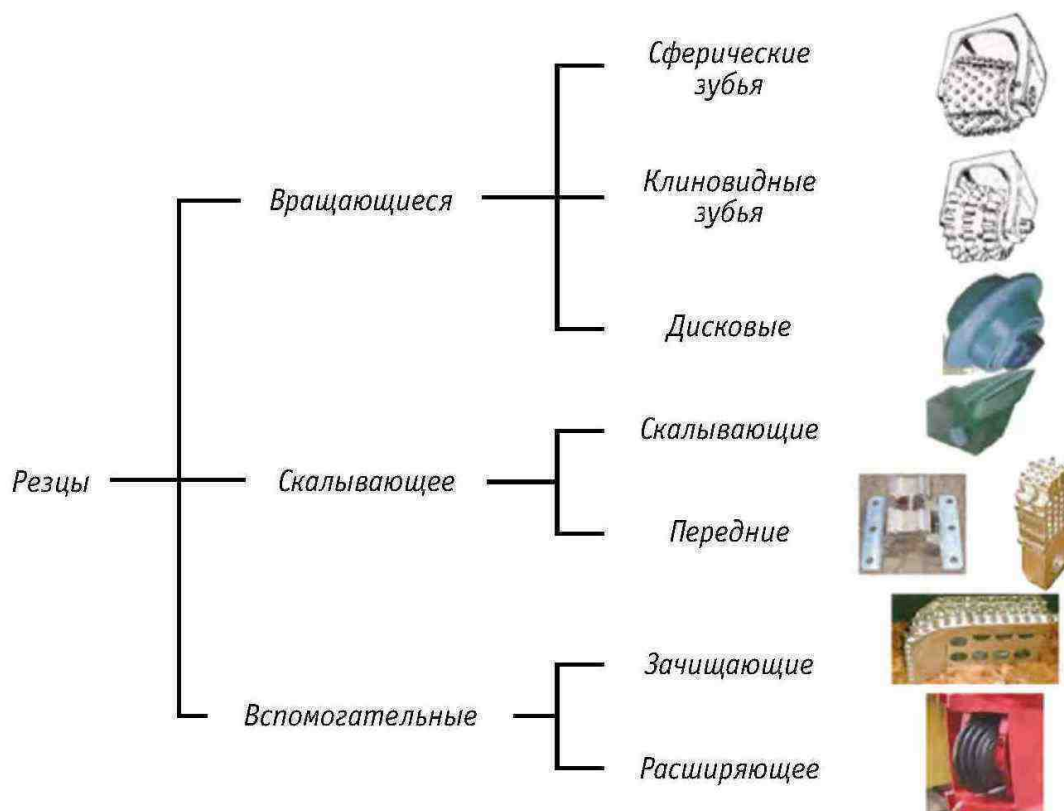


Рис. 6-1. Виды резцов проходческих щитов

В настоящее время в Китае существует путаница в названиях резцов. Особенно часто путают скалывающие и зачищающие. Скалывающие резцы выполняют функцию основного резца для дробления породы. Зачищающие резцы выравнивают поверхность забоя и не рассчитаны на активное бурение. Поэтому в ходе работы проходческого щита предъявляются строгие требования к замене дробящих резцов, несоблюдение чего может привести к заклиниванию щита.

Также существует много названий для стержневых резцов, обычно связанных с его формой: ракушка, квадратный. Основной функцией стержневых резцов является разрезание породы на отдельные куски, что создает более благоприятные условия для работы скалывающих резцов. Его основной принцип работы заключается в использовании бокового удара резцов, создаваемого при вращении вместе с резцовой головкой, для дробления или разрезания породы.

#### 1) Вращающиеся фрезы

##### (1) Виды вращающихся фрез

Вращающиеся фрезы по форме режущей кромки разделяются на зубчатые и дисковые. Среди зубчатых вращающихся фрез выделяют два вида: со сферическими зубьями и клиновидными (рис. 6-2).



*Рис. 6-2. Зубчатые и дисковые вращающиеся фрезы: а) зубчатые; б) дисковые*

По количеству дисков на оси дисковые вращающиеся фрезы разделяются на три вида: одно-, двух- и многодисковые. Двухдисковые вращающиеся фрезы обычно используют при работе в породе выветренного песчаника и глинистых грунтах, однодисковые – для более твердых пород (рис. 6-3).



*Рис. 6-3. Вращающиеся фрезы с разным количеством дисков: а) однодисковые, б) двухдисковые и в) трехдисковые*

По материалу кромки дисковые вращающиеся фрезы подразделяются на износостойкие, из стандартной стали, из сверхпрочной стали, с пластинами из твердых сплавов и другие. Кроме того, их применение зависит от типа пласта:

1. Износостойкие: подходят для проходки плотных пластов прочностью 40 МПа, гравелистых, песчаных, запесоченных глинистых и других пластов прочностью 80 – 100 МПа;
2. Из стандартной стали: подходят для проходки гравелистых пород прочностью 50 – 150 МПа, мраморных, песчаных и известняковых пластов;
3. Из сверхпрочной стали: подходят для проходки твердых пород прочностью 120 – 250 МПа, высокоабразивной породы прочностью 80 – 150 МПа, например, гранита, диорита, порфира, серпентина и базальта;
4. С пластинами из твердых сплавов: подходят для проходки гранитной, базальтовой, порфировой, кварцевой и других пластов прочностью 150 – 250 МПа.

(2) Форма сечения кромки резцов

На рис. 6-4 показаны различные формы сечения кромки дисковых вращающихся фрез, начиная от самых первых заостренных клиновидных форм (угол при вершине резца составляет  $60^\circ$ ,  $75^\circ$ ,  $90^\circ$  и  $120^\circ$ ) и притупленных клиновидных форм (с аналогичной величиной угла) до близких к кромке постоянного сечения (угол при вершине резца  $\theta_0 < 20^\circ$ , в том числе зауженная с плоским острием, зауженная с закругленным острием и широкая со сферическим острием), зубчатых, сварных и многих других форм. По сравнению с клиновидными формами вращающихся фрезы с кромками постоянного сечения (Constant cross section (CCS)) обладают хорошим соотношением частоты замены резцов, их стоимостью и глубиной врезания, а также подходящей шириной, что обеспечивает сохранение эффективной резки при возникновении абразивного износа.

## 2) Скальвающие резцы

### (1) Функция скальвающих резцов

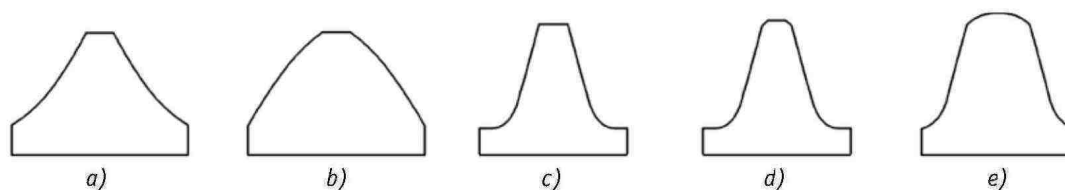


Рис. 6-4. Схематическое изображение клиновидной кромки: а) заостренная клиновидная; б) притупленная клиновидная; в) зауженная с плоским острием, г) зауженная с закругленным острием и д) широкая со сферическим острием

(2) Конструктивное оформление резка Резак состоит из твердосплавного лезвия и тела резка. В том числе твердосплавное лезвие впаяно к телу резка. В зависимости от способа пайки лезвия могут делиться на адгезионный тип и вставной тип.

На рис. 6-5 показан резак с припаянным лезвием сверху тела резка. Во время резки вся площадь острия погружается в грунт. Такой вид резка подходит для пласта из глинистой, пылеватой, алевроитовой породы. Применение скальвающего резка, усиленного соответствующей формой кромки, значительно повышает его ударопрочность. Такие резки все чаще используют в галечном пласте.



Рис. 6-5. Резак адгезионный и вставной: а) пайка сверху; б) в прорези

При пайке лезвия в прорези лезвие помещают в паз тела резка и припаивают, оставляя снаружи только режущую часть лезвия (рис. 6-5). Такие лезвия трудно вырвать, и они обладают высокой ударопрочностью. Их можно применять в галечном пласте.

На рис. 6-6 показаны разные виды крепления резка к резцовой головке: болтовое, шпоночное и сварное соединения.

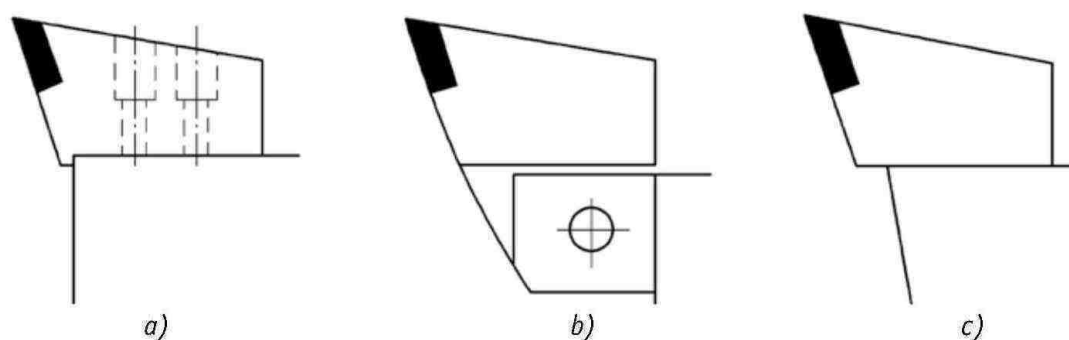


Рис. 6-6. Способы крепления резка в проходческих щитах: а) болтовое; б) шпоночное; с) сварное

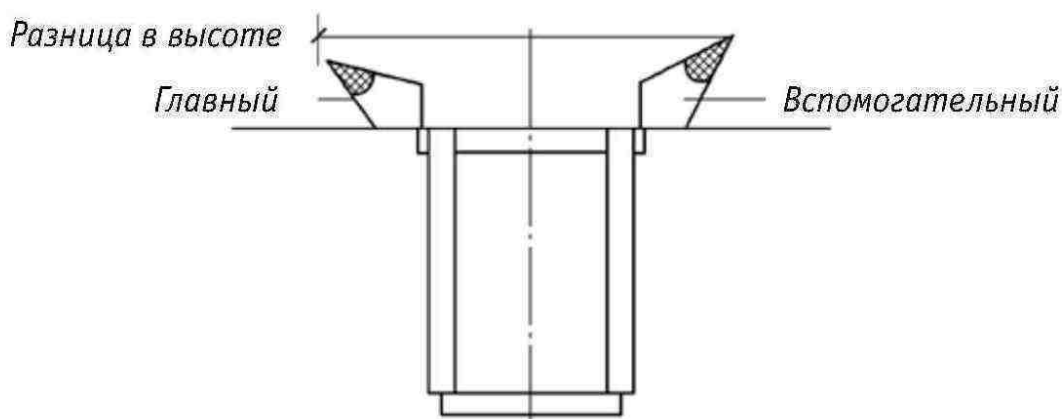
1. Болтовое соединение. Крепление резка к резцовой головке с помощью болта. Такое крепление легко заменить, но требуется принять меры для предотвращения ослабления и износа болтов, а также создать условия для замены в процессе проходки.

2. Шпоночное соединение. Крепление резка к резцовой головке с помощью цилиндрической шпонки. Его особенностью является вращение резка вокруг шпонки. При вращении резцовой головки во время резки грунта противоположное вращение резка отделять забой, что позволяет избежать абразивного износа. Кроме того, его удобно заменять. Однако требуется принять меры для предотвращения ослабления и износа шпонки, а также создать условия для замены в процессе проходки.

3. Сварное соединение. Крепление резка к резцовой головке с помощью сварки. Такое соединение отличается прочностью и стойкостью к отрыву, но резак сложно заменять. Однако при проходке в глинистой, пылеватой, алевритовой породах еще не возникало необходимости промежуточной замены таких резцов.

### (3) Проектирование износостойкой конструкции

Для повышения общей износостойкости резка обычно используют два уровня резцов из карбида вольфрама. В резке участвует главный и вспомогательный резак, отличающиеся по высоте (рис. 6-7). Принцип работы заключается в том, что когда абразивный износ главного резка превысит 20 мм, начинает работать вспомогательный резак. Таким образом увеличивается срок службы резка. Кроме того, на резцах возможна установка двух рядов зубьев из карбида вольфрама.



*Рис. 6-7. Схематичное изображение главного и вспомогательного резка проходческого щита*



*Рис. 6-8. Резак в виде бараньих рогов*

Существуют также другие формы резков, применяемых для определенных пород. Например, для высоковязких пород. При трудности разрушения породы вращающимися фрезами могут применять резки в виде бараньих рогов (рис. 6-8).

### *3) Стержневые резцы*

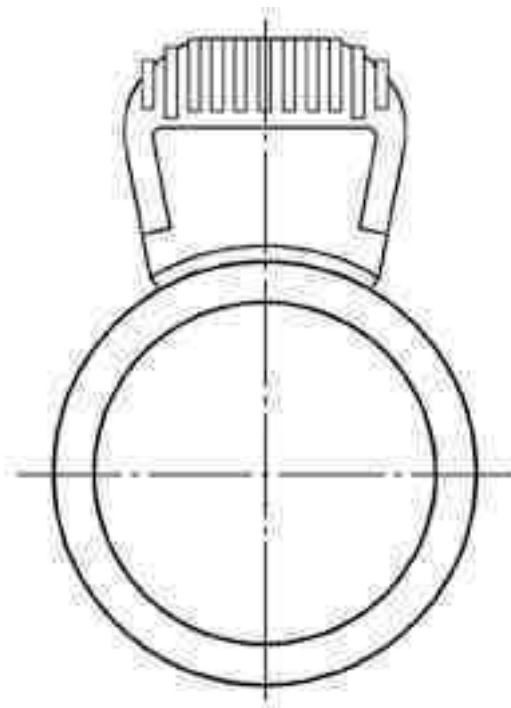
#### *(1) Функции*

В галечной и других рассыпчатых пластах отсутствует связующая сила, и величины крутящего момента на вращающиеся фрезы и поддерживающей силы для дробления породы недостаточно. Таким образом, вращающиеся фрезы не могут разрушить породы. В таком случае используют стержневые резки. Установка стержневых резцов обычно производится с задней части на определенных местах лучей резцовой головки с вылетом дальше резков. Стержневые резцы прорезают узкие щели и разрыхляют плотный пласт перед резками (особенно при работе в твердых пластах). Таким образом, повышается эффективность работы резков в гравийных и других твердых пластах. Кроме того, импульсная сила от скоростного вращения стержневых резцов с резцовой головкой оказывает «ударное» дробящее действие на гравийные, галечные и валунные породы, тем самым продлевая срок службы резков.

#### *(2) Форма конструкции*

Существует три основных формы стержневых резцов: раковинovidная (рис. 6-9) и квадратная (рис. 6-10). В проходческих щитах японского производства и немецкой компании Herrenknecht чаще используются раковинovidные стержневые резцы. Канадский производитель Lovat Inc и французский NFM в основном используют стержневые резцы квадратной формы. Следует учитывать, что крутящий момент при приведении в движение резцовой головки должен быть больше, чем сумма всех сил трения, которые возникают при вращении

резцовой головки, его деталей и при резке грунта. Таким образом, если при щитовой проходке в галечном пласте скорость вращения резцовой головки или крутящий момент снижаются, стержневые резцы только играют роль рыхлителя и не могут эффективно дробить гравий.



*Рис. 6-9. Раковиновидные стержневые резцы*



*Рис. 6-10. Стержневые резцы квадратной формы*

### (3) Проектирование износостойкой конструкции

Стержневые резцы проектируются с учетом двухстороннего вращения резцовой головки. Как правило, стержневые резцы припаиваются к резцовой головке. В стержневых резцах также могут использовать два уровня износостойкости, а также два ряда зубьев из карбида вольфрама.

#### 4) Скребок

##### (1) Функции

Скребок уберет грунт по краям забоя, предотвращая его оседание, а также сохраняют величину диаметра работы резцовой головки и предотвращают износ его внешних краев. Установка скребка обычно производится с задней части на внешнем крае резцовой головки. Их замену можно производить в землеприемном отсеке.

##### (2) Форма

Для повышения износостойкости резцовой головки и обеспечения сохранения соответствующего диаметра забоя при проходке нескольких тысяч метров на кромке скребка располагают сплошной ряд зубьев из карбида вольфрама и двойной ряд штырей из карбида вольфрама. Непосредственно для скребка достаточно наличие одного сплошного ряда зубьев из карбида вольфрама, так как такие скребки режут только край забоя, тогда как резки работают по всей его ширине. На *рис. 6-11* изображены различные формы скребков.

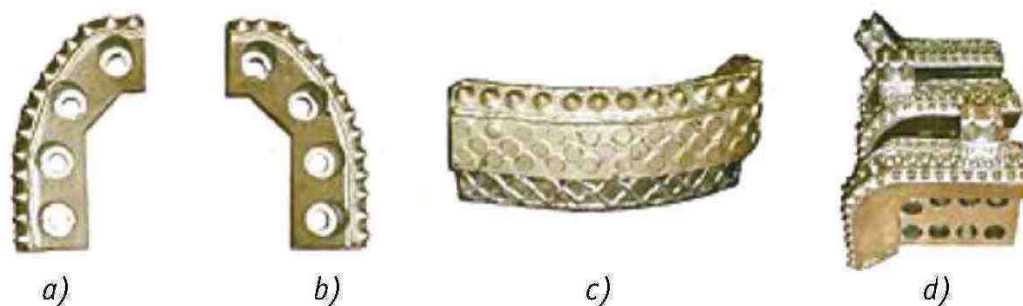


Рис. 6-11. Различные формы скребков

5) *Копировальные резцы* Копировальные резцы устанавливают на внешнем крае резцовой головки (рис. 6-12). Оператор проходческого щита может контролировать глубину и место врезания копировальных резцов в грунт (т. е. избыточную проходку) с помощью датчиков вращения резцовой головки, а также управлять гидравлическим цилиндром с помощью программируемого контроллера. Например, при необходимости поворота щитовой проходки и забоя влево вытягивают левые копировальные резцы, что дает возможность разрывать под углом до  $45^\circ$  относительно горизонтального диаметра.

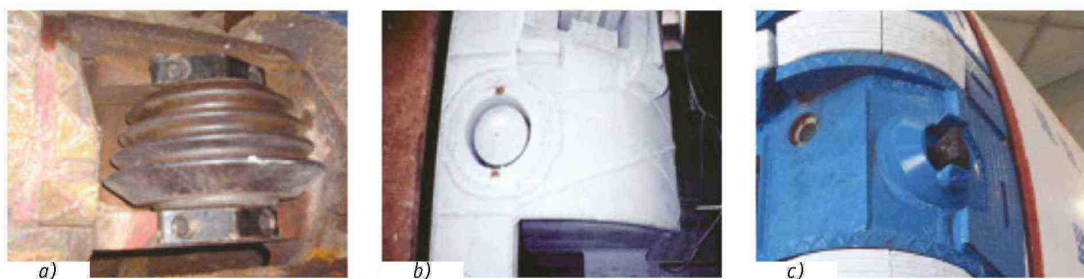


Рис. 6-12. Фотографии копировальных резцов

#### 6) «Рыбий хвост»

Устанавливается в центре резцовой головки проходческого щита. Используется при работе с галечным или прочным глинистым пластом. Резец «рыбий хвост» выступает дальше скребка на 200 – 300 мм. Такой резец предварительно разрывает породу перед центральной частью резцовой головки, улучшает подвижность грунтовую массу, предотвращает образование глинистой корки, уменьшает трение зачищающих резцов и снижает абразивный износ. Как правило, длина резца составляет 1200 – 1500 мм, высота – 400 – 500 мм. Резец «рыбий хвост» не располагают на одной плоскости с другими резцами. Он первым разрезает грунт и разрыхляет первичный пласт. Корневая часть резца конусообразная, что позволяет лучше проворачивать срезанную грунтовую массу. Таким образом, обеспечивается резка грунтовую массу в центральной части и улучшается подвижность срезанной грунтовой массы (рис. 6-13).

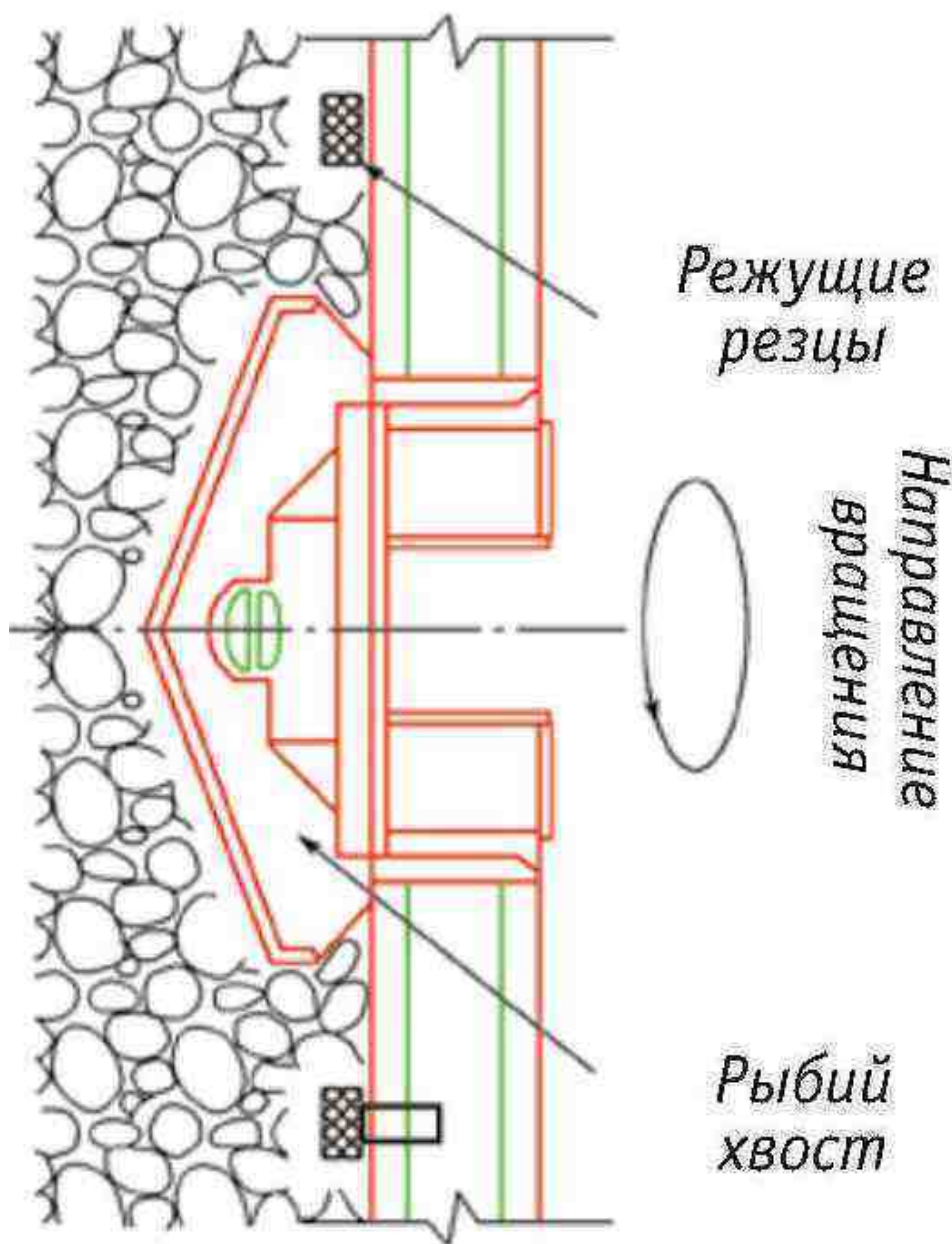


Рис. 6-13. Резец «рыбий хвост»

### 6.1.2. Механизм разрушения породы резцами и причины выхода из строя

#### 1) Червячная фреза

##### (1) Кинетические характеристики

Дробление породы червячными фрезами является самым эффективным способом. Он обладает следующими кинетическими характеристиками (рис. 6-14): вращаясь, червячная фреза движется вокруг центральной оси резцовой головки и вокруг своей оси. Если предположить, что при дроблении породы червячная фреза только перекатывается (без скольжения) с определенной глубиной врезания, тогда движение становится плоским. Траектория движения любой частицы на окружности кромки резца представлена на рис. 6-14b.

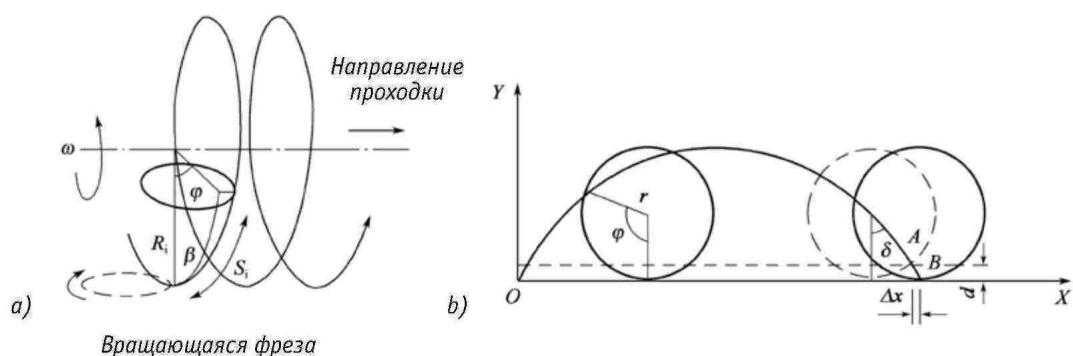


Рис. 6-14. Траектория пространственного движения червячных фрез при поворотном дроблении породы червячными фрезами: а) траектория движения; б) траектория движения кромки резца

## 2) Механизм разрушения породы

Под сильным напором резцовой головки установленные на него червячные фрезы давят на поверхность породы. Когда контактное напряжение фрезы и породы превышает одноосное сопротивление породы, червячная фреза разрушает породу и образует под острием плотные частицы каменной муки. Кроме того, под действием крутящего момента червячные фрезы образуют на поверхности забоя борозды. При дальнейшем углублении борозды на поверхности породы увеличиваются трещины. Когда предел прочности на разрыв породы превышен, трещины между смежными бороздами соединяются, порода расслаивается и откалывается большими кусками (рис. 6-15). Таким образом, дробление породы червячной фрезой основано на производимом вращением ударном и режущем действии.

Стоит отметить, что червячные фрезы не могут дробить валунные и гравийные породы, за исключением скальной породы на поверхности забоя. При разрушении породы червячными фрезами главным параметром является сила напора резцовой головки, которая определяет крутящий момент и другие параметры. Однако при определении мощности дробления основным параметром является значение крутящего момента.

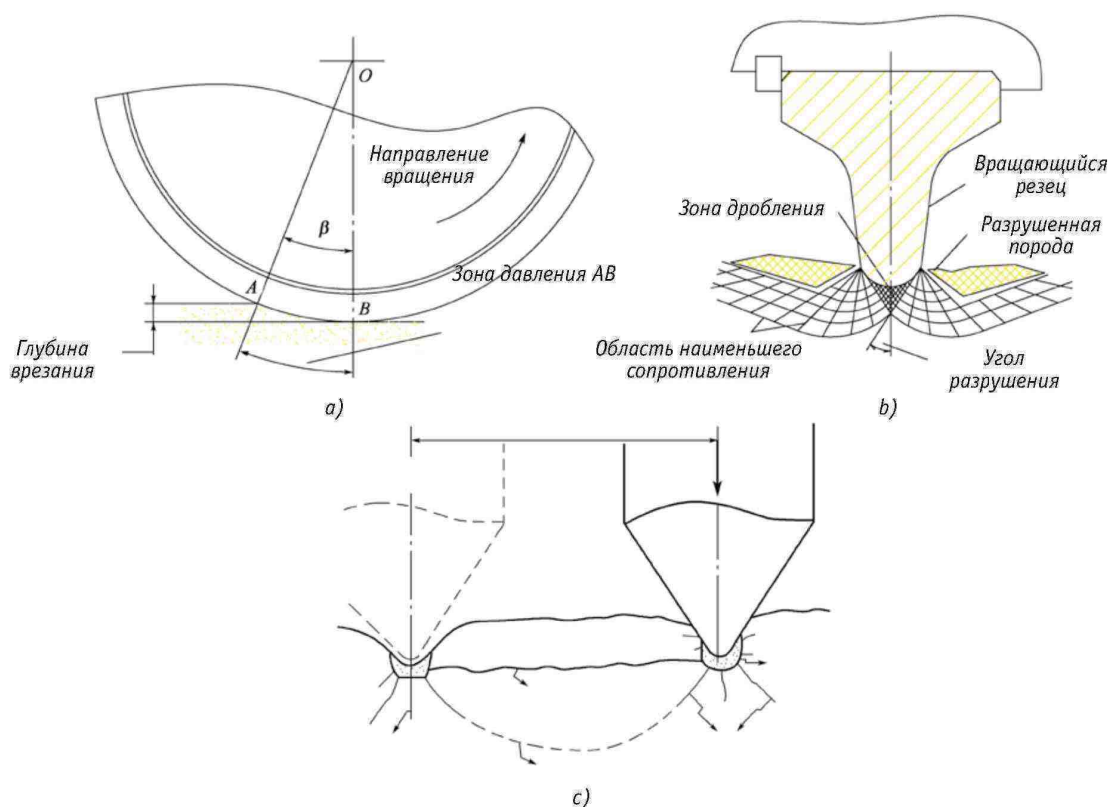


Рис. 6-15. Схематичное изображение механизма разрушения породы червячными фрезами: а) поперечный разрез при действии одного резца; б) продольный разрез при действии одного резца; в) продольный разрез при действии двух резцов

### (3) Типичная форма выхода из строя

Учитывая специфическую конструкцию, механизм действия и геологические условия применения вращающихся фрез, существуют следующие типичные формы выхода из строя и поломки:

#### 1. Нормальный абразивный износ

Нормальным износом червячных фрез считается превышение установленного значения ширины острия. Для определения такого абразивного износа требуется применение измерительных приборов. Нормальный износ является основной причиной утраты эффективности фрезы.

#### 2. Облом кромки

В ходе проходки порода может меняться на более жесткую, и некоторые детали резцовой головки могут оборваться или застрять между породой и резцом. Это может привести к перегрузке и концентрации напряжения на кромке и последующему скалыванию. Кроме того, недостаточное сцепление кромки с телом резца также может привести к разлому (рис. 6-16а).

#### 3. Клинообразный износ кромки

Основной причиной клинообразного износа кромки являются геологические факторы или повреждение подшипника (рис. 6-16б).

Когда поверхность забоя представлена в виде пород с меньшим сопротивлением, таких как пластичная глина, гравий и выветренная порода, вращающиеся фрезы не получают достаточного крутящего момента (силы трения). Кроме того, из-за повышенной вязкости пластиной глины происходит засор червячных фрез и отверстий, на поверхности резцовой головки образуется глинистая корка. В таком случае червячная фреза не может проворачиваться надлежащим образом, что приводит к клинообразному износу.

При повреждении подшипника червячная фреза также не может вращаться по поверхности забоя, что приводит к одностороннему износу.

В случае, когда в верхней части поверхности забоя находится мягкий пласт, а в нижней – жесткий, дисковые червячные фрезы, повернувшись за резцовой головкой до верхней части, не получают достаточного крутящего момента из-за более мягкого качества выветренной породы. Кроме того, образуется глинистая корка. В таком случае червячная фреза не может проворачиваться надлежащим образом. Однако когда червячные фрезы опускаются в нижнюю часть забоя, где сопротивление породы выше, вращение червячной фрезы налаживается. Таким образом, при работе со смешанной породой происходит частичное нарушение вращения дисковых червячных фрез, что приводит к многостороннему клинообразному износу.

Несвоевременное выявление износа червячной фрезы ускоряет ее износ, приводит к перегрузке и потере эффективности смежных червячных фрез, что может повлиять на все резцы на резцовой головке.

#### 4. Течь масла резцов

Течь масла из червячной фрезы возникает при нарушении герметизации. Основными причинами являются повреждение подшипника, перегрузка резцов, отказ от герметизации и т. д.

Повреждение подшипника (рис. 16-бс) может быть вызвано слабым креплением подшипника (или слишком туго), смещением внутреннего кольца или снижением несущей способности и другими неисправностями, вызванными предельным сроком службы или несоответствующей сборкой червячной фрезы (недостаточная сила затяжки резца, превышение размера манжеты, недостаточное натяжение подшипника).

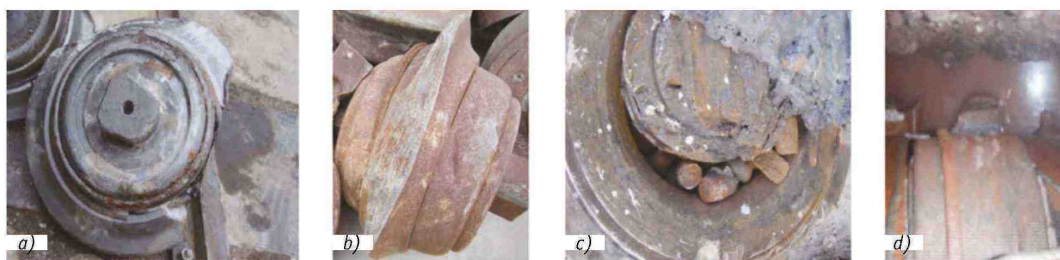


Рис. 6-16. Виды повреждений резца: а) обломки кромки; б) неровный износ кромки; с) повреждение подшипника; d) осыпание фрезы

#### 5. Выкрашивание кромки

Отслаивание куска от поверхности кромки фрезы без разлома всей фрезы называется «выкрашивание кромки» и классифицируется как <поломка кромки> (рис. 6-16d). Выкрашивание кромки происходит из-за образования усталостных трещин на поверхности кромки, постепенное расширение которых приводит к микроразрывам и отслаиванию. Незначительные обломки не влияют на работу резца.

#### 6. Разрыв или выпадение стопорного кольца

Упорное кольцо используется для предотвращения параллельного смещения кромки вдоль оси. Его разрыв или выкрашивание приводит к сдвигу кромки.

#### 2) Резак

##### (1) Механизм резания резка

При вращении резцовой головки и продвижении проходческого щита вдоль туннеля резки оказывают сдвигающее усилие на поверхность забоя вдоль туннеля и силу резания по направлению вращения резцовой головки. Острие и головка резца погружается в породу и сре-

зает ее. В зависимости от породы забоя и механических характеристик резков, а также их конструктивных параметров и параметров резки отделяемый пласт разделяют на четыре вида: текучий, разрываемый, скальваемый и срезаемый. Действие резков и грунтовой массы соответствует теории Ренкина о давлении грунта. Грунтовая масса перед резком испытывает пассивное давление грунта. На основании теории Ренкина и модели сопротивления почвообрабатывающих резцов McKyes и Али рассчитано влияние силы трения и вертикальной тяги при резании резками проходческого щита. Создана трехмерная прогностическая модель прямого срезания грунта резками. Неэффективные зоны грунтовой массы (центральная и две зоны в виде полумесяца на боковой части) (рис. 6-17).

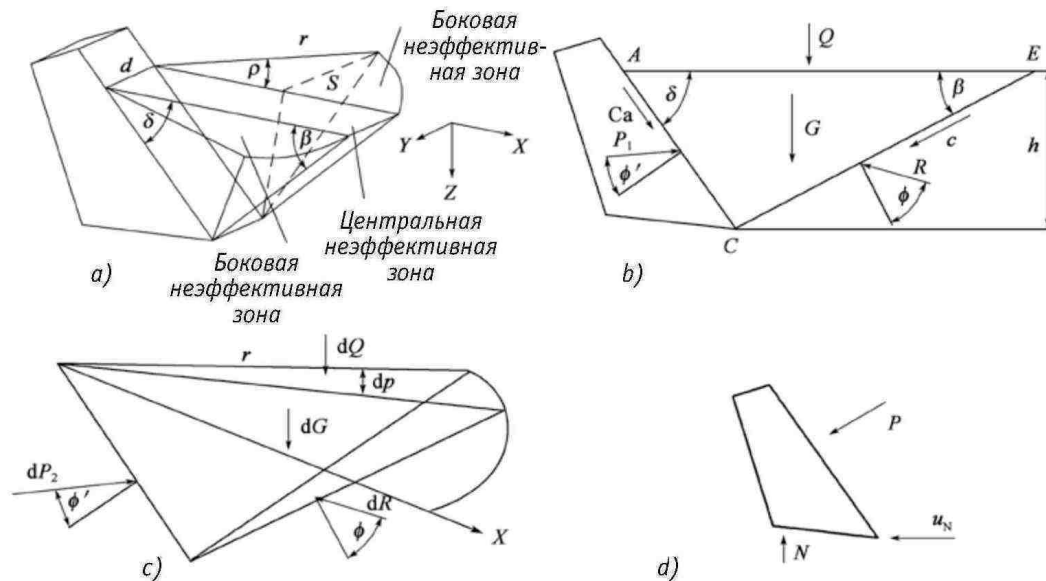


Рис. 6-17. Схема механизма резания грунта резками: а) неэффективные зоны; б) действие силы в центральной неэффективной зоне; в) действие силы в боковой неэффективной зоне; г) действие силы при резке

## (2) Механизм сгребания грунта резками

Передний и задний углы резка скошены для срезания твердых пород и сгребания мягкой почвы (рис. 6-18). Как показано на рис. 6-19, при проходке грунт со шлаком движется вдоль пунктирной линии и не попадает на нижнюю часть резка, что позволяет избежать порчи резка при проходке твердых пород. Чем дальше расположен резец от центра резцовой головки, тем выше линейная скорость и медленнее траектория движения грунта со шлаком. Таким образом можно увеличить расстояние между двумя резками.

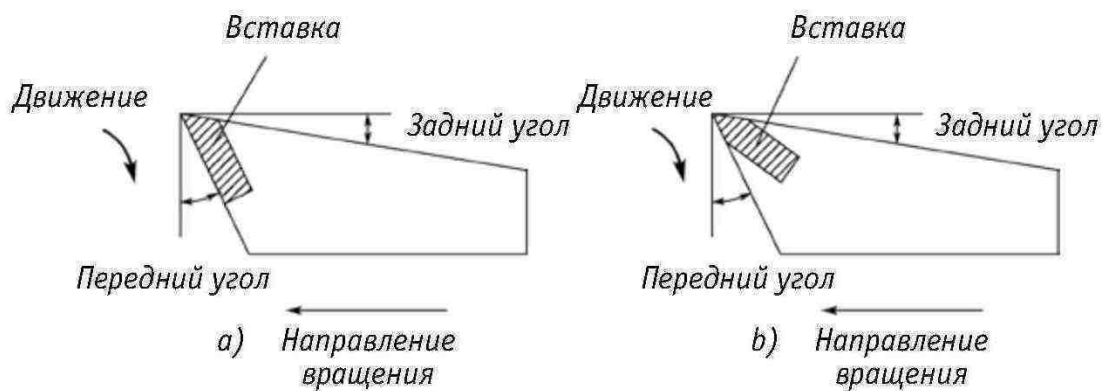


Рис. 6-18. Формы резков

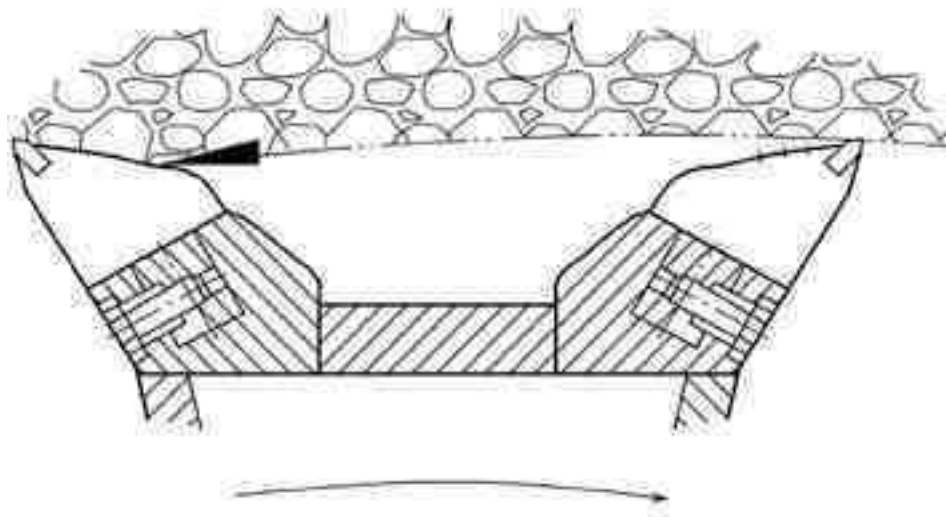


Рис. 6-19. Схема защиты резка при проходке в твердых породах

(3) Типичная форма выхода из строя К распространенным причинам выхода из строя резков относятся: поломка лезвия, отслоение твердосплавного лезвия, разрыв болтов (отверстий), износ лезвия и выкрашивание резца (рис. 6-20).



*Рис. 6-20. Поломки резцов: а) износ острия; б) выкрашивание резца*

### *3) Механизм разрушения породы стержневыми резцами*

Тяжелые стержневые резцы в основном используют в галечной породе. Принцип действия заключается в «ударном» дробящем действии на гравийные, галечные и валунные породы импульсной силой, образованной скоростным вращением стержневых резцов с резцовой головкой. Стержневые резцы разрезают грунт на куски, что обеспечивает условия для работы резцов. Кроме того, они увеличивают подвижность породы, значительно снижают крутящий момент для резцов, повышают их эффективность и сокращают износ. Стержневые резцы обладают высокой эффективностью при работе в пластах рыхлых пород, особенно в галечном и валунном пласте. При работе в валунном пласте прочность стержневых резцов должна выдерживать ударную нагрузку, создаваемую при дроблении валунов, для избежания повреждения резцов. На *рис. 6-21* показан тяжелый стержневой резец, используемый для валунного пласта.



*Рис. 6-21. Тяжелый стержневой резец*

В связи с тем, что в галечных пластах отсутствует связующая сила, величины крутящего момента на червячные фрезы и поддерживающей силы для дробления ими породы недостаточно. Поэтому червячные фрезы не используют для такого грунта. При низкой скорости вращения резцовой головки или недостаточном крутящем моменте стержневые резцы в галечных породах могут только играть роль рыхлителя, неспособного эффективно дробить гальку.

Стержневые резцы дробят породу ударной силой. В месте их действия образуются три зоны: зона разрушения, зона разрыва и зона без повреждений (рис. 6-22).

(1) Зона разрушения

При вращении стержневых резцов вместе с резцовой головкой они воздействуют на породу сильными ударами. В месте контакта стержневых резцов с породой возникает большая ударная сила. Когда величина этой силы достигает или превышает величину силы сопротивления породы, в толще породы происходят разрывы, и она разрушается.

(2) Зона разрыва

Зона разрыва также называется зоной повреждения. Когда величина ударной силы стержневых резцов меньше силы сопротивления породы, в породе возникает множество повреждений. Под ударной силой появляются и расширяются трещины. При достижении определенных размеров они соединяются, и происходит раскол породы.

(3) Зона без повреждений

При ударной силе стержневых резцов меньше усталостной прочности породы сила их воздействия не вызывает появления трещин, и порода не повреждается. Ударная сила рассеивается и оказывает только шлифующее действие на данный участок. Соседние два стержневых резца, вращаясь вместе с резцовой головкой, способствуют образованию трещин рядом с зоной разрушения, их расширению и последующему расколу (рис. 6-23). Сумма величин крутящего момента ( $T_{tot}$ ), передаваемого на резцовую головку при щитовой проходке, описывается следующей формулой:

$$T_{tot} = T_1 + T_2 + T_3$$

(6-1),

где:  $T_1$  – крутящий момент, необходимый для преодоления трения вращения резцовой головки;  $T_2$  – крутящий момент, необходимый для преодоления силы резания резцовой головки;  $T_3$  – крутящий момент, необходимый для преодоления силы инерции вращающихся частей.

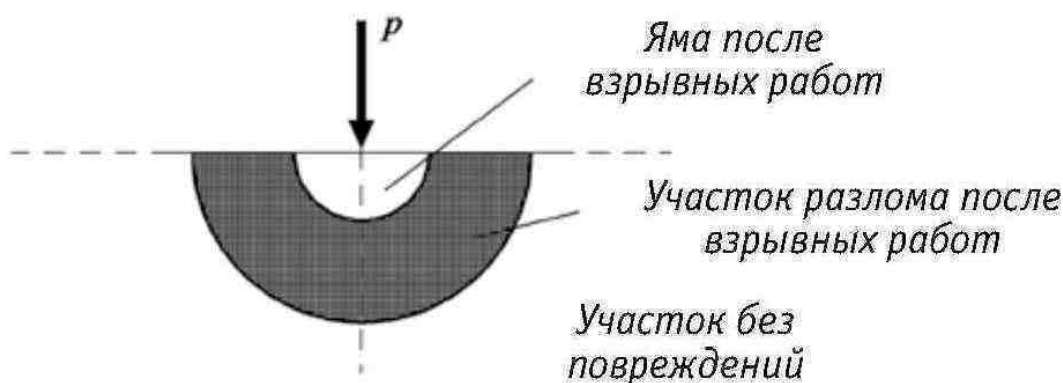


Рис. 6-22. Схема изорванной формы

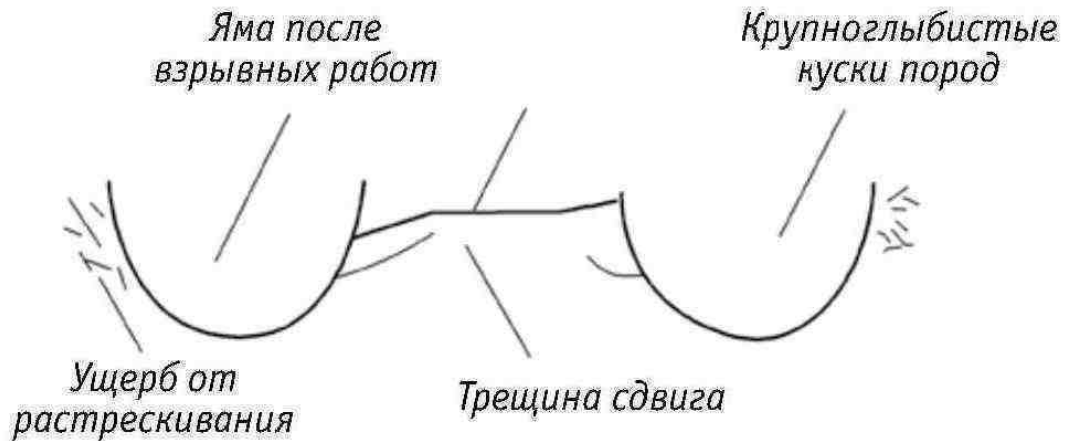


Рис. 6-23 Диаграмма взрывания каменных пород гребня

Если предположить, что эрратические валуны в пласте вызывают резкое увеличение сопротивления резания  $F_t$ , импульс на инструменте ( $I = R_i F_t dt$ ) создается угловым моментом всех вращающихся частей  $M = J\omega$ . Где:  $R_i$  – установочный радиус сопротивления резания,  $J$  – момент инерции вращающейся части,  $\omega$  – угловая скорость вращающейся массы, тогда:

$$\int R_i F_t dt = J d\omega$$

(6-2),

Правую часть уравнения можно получить отдельно от момента количества движения каждой вращающейся части:

$$J d\omega = (J_C + J_M + N r_1 J_G + N r_2 J_E) d\omega_C$$

(6-3),

где:  $J_C$  – момент инерции резцовой головки;

$J_M$  – момент инерции коренного подшипника;

$J_G$  – момент инерции редуктора;

$J_E$  – момент инерции ротора электродвигателя;

$N$  – количество приводов;

$r_1$  – передаточное отношение большого зубчатого венца;

$r_2$  – передаточное число редуктора;

$\omega_C$  – угловая скорость резцовой головки.

Отсюда видно, что увеличение скорости вращения режущего диска может увеличить угловую скорость режущего диска, что способствует увеличению углового момента угловой кромки и дробления горной породы. Кроме того, если используется гидравлический привод,

момент импульса двигателя не существует, и соответствующий момент импульса должен быть уменьшен. Таким образом, использование электрического привода более способствует дроблению горной породы с помощью ножа.

### 6.1.3. Функция резцовой головки

В качестве примера возьмем резцовую головку спицевого типа, как показано на *рис. 6-24*. Система резцовой головки включает в себя инструменты (такие как червячные фрезы, резак, дуговые скребки, копирующий резак и т. д.) и основную конструкцию резцовой головки. Среди них основной корпус резцовой головки снабжен характерными конструкциями, такими как пористое отверстие, открывающаяся канавка, периферийное отверстие, износостойкая полоса и стержень для перемешивания. Система резцовой головки вместе выполняет следующие три основные функции:

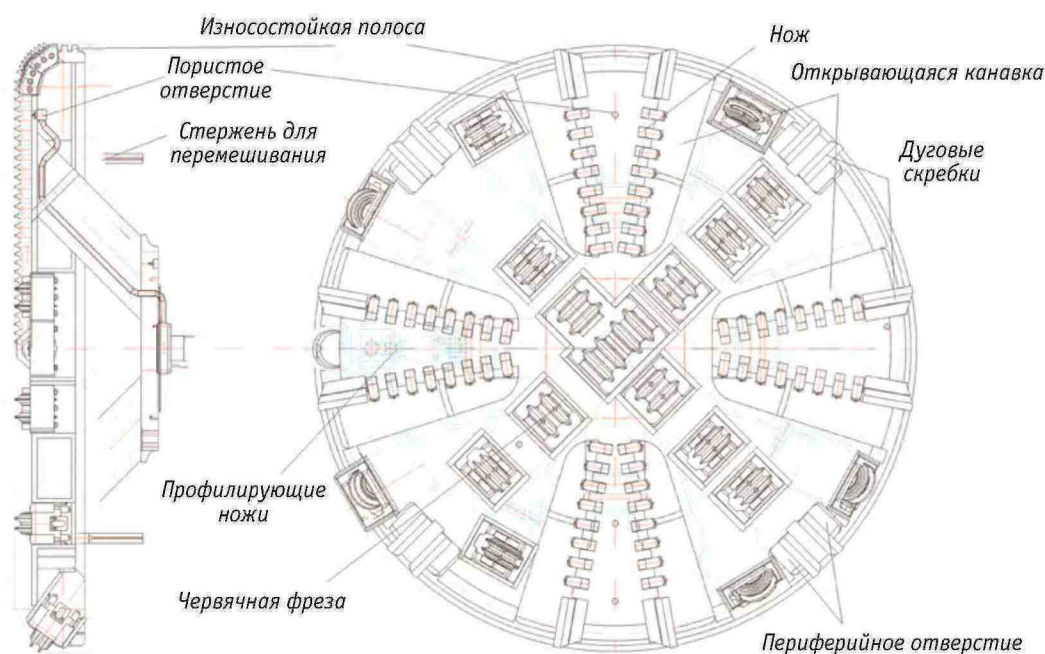
(1) Функция выемки грунта: когда резцовая головка вращается, фреза разрезает грунтовую массу на поверхности туннеля, так что вынутый грунт со шлаком попадает в почвенную камеру через отверстие резцовой головки.

(2) Функция стабилизации: поддержка и стабилизация поверхности.

(3) Функция перемешивания:

1. Для выравнивания давления на грунт при щитовой проходке резцовая головка перемешивает почву со шлаком в резервуаре для грунта, чтобы он имел определенную степень пластичности, а затем выгружает его через винтовой конвейер.

2. Для защитной конструкции из грязевой воды срезанная почва со шлаком полностью смешивается с бентонитовой почва со шлаком путем вращения и перемешивания круга ножа, оптимизации регулирования давления грязевой воды и улучшения однородности грязи, а извлеченная почва со шлаком перекачивается в жидком виде на станцию разделения грязевой воды, расположенную на земле, через выпускную трубу для грязи.



*Рис. 6-24. Конструкция резцовой головки с защитным экраном*

### 6.1.4. Тип и конструкция резцовой головки

1) Разделение по структуре

### (1) Панельная резцовая головка

Панельная резцовая головка, показанная на *рис. 6-25*, проста в установке червячных фрез, поэтому подходит для рытья туннелей, содержащих пласты породы. Опора резцовой головки разделяет почвенный бункер на две части. Преимущества и недостатки:

1. Во время проходки экранированных туннелей возникает перепад давления между давлением грунта в резервуаре для грунта и давлением грунта на поверхности выемки, а величину перепада давления определить нелегко из-за влияния раскрытия панели, что делает затруднительным контроль давления грунта на поверхность выемки.

2. Из-за влияния скорости открывания панели почва со шлаком не плавно поступает в отсек для грунта, легко склеивается и засоряет, нагрузка на инструмент велика, а срок службы короткий. Особенно при строительных работах со слоями глины, хотя почва за пределами центральной области резцовой головки течет плавно, поток почвы в центральной области плохой, и она легко накапливается в течение длительного времени, образуя глинистую корку.

3. Размер гальки, попадающей в резервуар для почвы, можно ограничить, задав размер отверстия резцовой головки.

### (2) Резцовая головка со спицами

Резцовая головка со спицами, показанная на *рис. 6-26*, подходит для работы с песком, гравием и мелкозернистыми песчаными и галечными образованиями. Преимущества и недостатки:

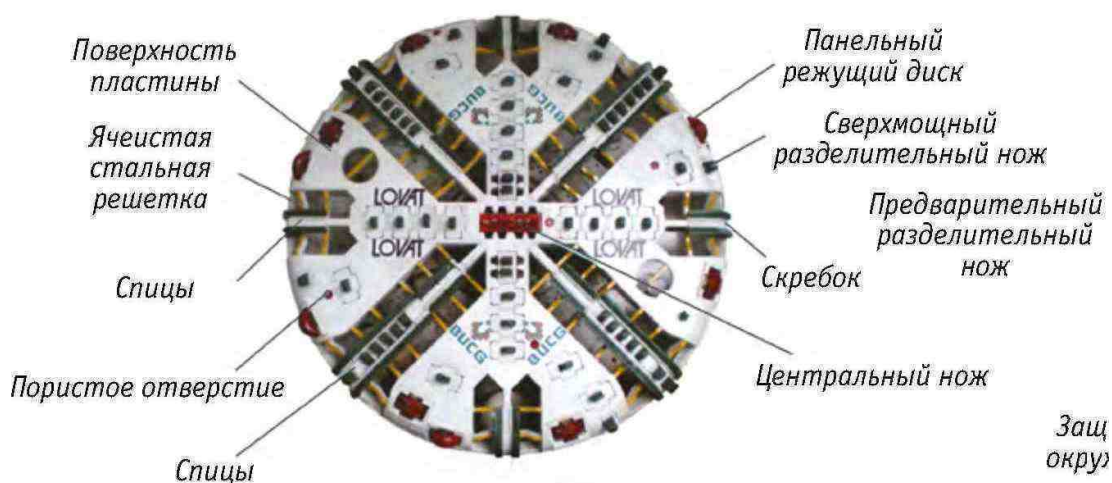


Рис. 6-25. Панельная резцовая головка

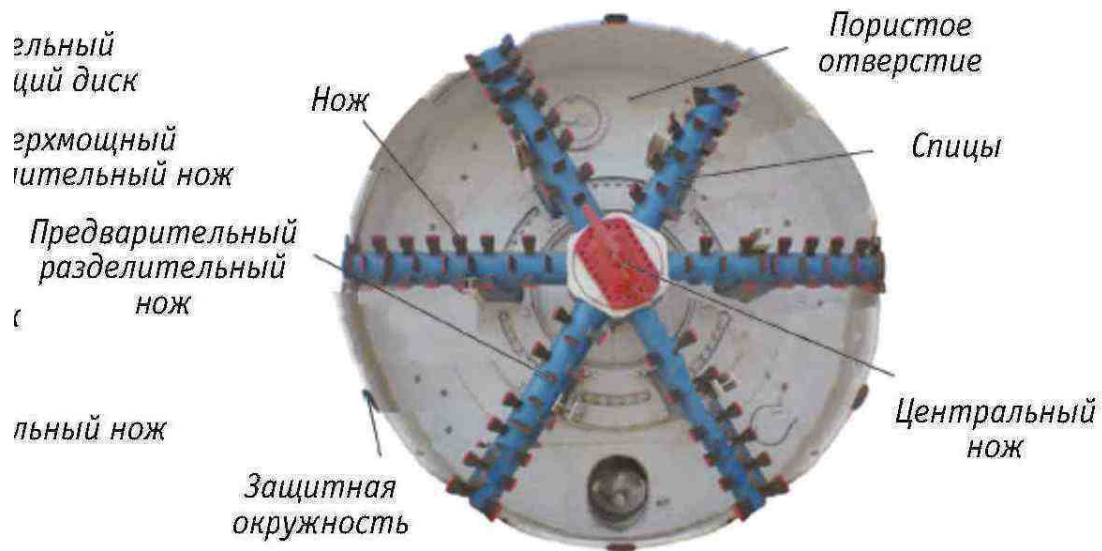


Рис. 6-26. Резцовая головка со спицами

1. Имеется всего несколько спиц с большим коэффициентом раскрытия от 70% до 75%, а за спицами находится стержень для перемешивания, обеспечивающий плавное поступление почвы и песка и помогающий предотвратить прилипание глины, которая склеивается и блокирует.

2. Поскольку блокировка панелей отсутствует, почва со шлаком напрямую попадает в резервуар для грунта с поверхности выемки, также отсутствует ослабление давления грунта, то есть давление грунта на поверхность выемки равно измеренному давлению грунта, поэтому можно эффективно держать под контролем оседание поверхности земли.

3. Нагрузка на резец небольшая, а срок службы большой.

4. Червячная фреза легко устанавливается (рис. 6-27), и ее можно использовать для проходки туннелей в выветриваемых породах, пластах с неравномерной твердостью или пластах из твердых пород.

5. Червячная фреза, как правило, рассчитана на взаимозаменяемость с рожковым резком для снятия фаски. Таким образом, червячная фреза в соответствии с геологическими потребностями может быть заменена рожковым резком для снятия фаски. Она более приспособлена к одному мягкому слою почвы, например, к песку и почве, чем панельная резцовая головка.

6. Установки на съемную панель спицы достаточно, для того чтобы превратить в панельную резцовую головку.

7. Режущий нож расположен послойно, что позволяет укрепить сплав режущего ножа, чтобы повысить его износостойкость и ударопрочность.

8. Износ резца резцовой головки велик, и улучшить качество почвы со шлаком сложнее.

В отличие от этого резцовая головка спицевого типа более приспособлена к одному слою мягкой почвы, такой как песок и почва, чем резцовая головка панельного типа. Поэтому для защиты от шлама обычно используется панельная резцовая головка. Щит грунтопригруза на землю может иметь панельный или спицевый тип в зависимости от различных почвенных условий.

(3) Комбинированная резцовая головка

Преимущества и недостатки комбинированной резцовой головки

1. Пласт мягкого грунта легко образует глинистую корку и блокирует кабину во время строительных работ. Поэтому рекомендуется использовать небольшую панель и резцовую

головку со спицами (рис. 6-28), а также центральную опорную конструкцию колонны, чтобы уменьшить образование глиняной корки в центре.



*Рис. 6-27. Резцовая головка со спицами и червячной фрезой*



*Рис. 6-28. Резцовая головка со спицами для малых панелей*

2. Галечные образования легко изнашивают резцовую головку, особенно нелегко сломать гальку большого диаметра, поэтому целесообразно использовать комбинированную резцовую головку со спицами (рис. 6-29) и «дренажную комбинацию» с червячной фрезой для разрушения крупной гальки.

3. При строительстве в горных породах резцовой головки должен иметь высокую способность к разрушению горных пород, и следует использовать панельную комбинированную резцовую головку (рис. 6-30).



*Рис. 6-29. Комбинированная резцовая головка со спицами*



*Рис. 6-30. Панельная комбинированная резцовая головка*

2) *Разделение по методу опоры резцовой головки* (1) Метод поддержки центра Режущая головка с центральной опорой, показанная на *рис. 6-31a*, обычно используется для прямой щитовой проходки малого и среднего размера. Когда резцовая головка этого типа вращается, чтобы разрезать почву, почва в резервуаре для почвы имеет большое пространство для потока и большой диапазон прямого перемешивания, почва течет плавно, почва имеет хороший эффект перемешивания и возможность адгезии глины небольшое, а значит вероятность засорения невелика. Давление на забое при выемке грунта относительно стабильно, поэтому эффект туннелирования экрана лучше, а его характеристики по контролю оседания грунта улучшаются. Однако из-за небольшого пространства внутри машины трудно работать с крупными камнями и галькой.

Метод промежуточной поддержки, показанный на *рис. 6-31b*, имеет относительно сбалансированную конструкцию резцовой головки и в основном используется для щитовой проходки среднего и большого диаметра. При использовании щитов малого диаметра следует серьезно подумать о предотвращении налипания глиняных корок к центру. Благодаря наличию промежуточной поддержки защитный резервуар для грунта разделен на две части, при этом центральная часть занимает в резервуаре для грунта значительное пространство. Когда резцовая головка вращается и режет почву, почва за пределами центральной области течет плавно и легко перемешивается; поток почвы в центральной области слабый. Когда разрезаемый грунт относительно вязкий и накапливается в центральной области в течение длительного времени, он постепенно увеличивается и в конечном итоге образует глиняную корку, которая полностью теряет свою текучесть. Текучесть почвы во внутренней и внешней областях весьма различна, и трудно обеспечить эффект перемешивания почвы. Когда резцовая головка использует щит с промежуточной опорой для строительных работ в связном грунте (включая мелкодисперсный песок), если обработка не является хорошей, не всегда легко удовлетворить требованиям режущего эффекта перемешивания почвы в почвенной камере, и глинистые корки могут образовываться из-за прилипания и забивания, что приводит к плохой выемке грунта, повышенному

сопротивлению и нестабильному контролю давления на поверхность выемки. Следовательно, эффект туннельной проходки подвергается влиянию, и это неблагоприятно для контроля проседания поверхности земли.

## **Конец ознакомительного фрагмента.**

Текст предоставлен ООО «Литрес».

Прочитайте эту книгу целиком, [купив полную легальную версию](#) на Литрес.

Безопасно оплатить книгу можно банковской картой Visa, MasterCard, Maestro, со счета мобильного телефона, с платежного терминала, в салоне МТС или Связной, через PayPal, WebMoney, Яндекс.Деньги, QIWI Кошелек, бонусными картами или другим удобным Вам способом.