

НОВЫЙ ОПЫТ СТРОИТЕЛЬСТВА ТРАНСПОРТНОЙ РАЗВЯЗКИ: УСТРОЙСТВО ТУННЕЛЕЙ В БОСТОНЕ ПРИ ПОМОЩИ ДОМКРАТОВ

А. ДЖ. ПАУДЭРХЭМ – директор по транспорту компании «Mott MacDonald Group», член Королевской инженерной Академии наук (г. Лондон, Великобритания).

Переустройство Центральной магистрали (Central Artery) в Бостоне (штат Массачусетс, США) явилось историческим событием в развитии городской инфраструктуры. Проект будет завершен в 2005 г., но уже сейчас он способствует активизации жизни города. Основной задачей при выполнении проекта являлась минимизация разрушений в ходе проведения строительных работ. Для этого было принято решение по устройству туннеля при помощи домкратов. Подобные работы уже проводились в США, но в данном проекте применялось множество инноваций, и он стал самым сложным и масштабным проектом подобного рода. Благодаря использованию новых технологий удалось сэкономить 300 млн дол., уменьшить затраты на техническое обслуживание и снизить негативное воздействие на окружающую среду.

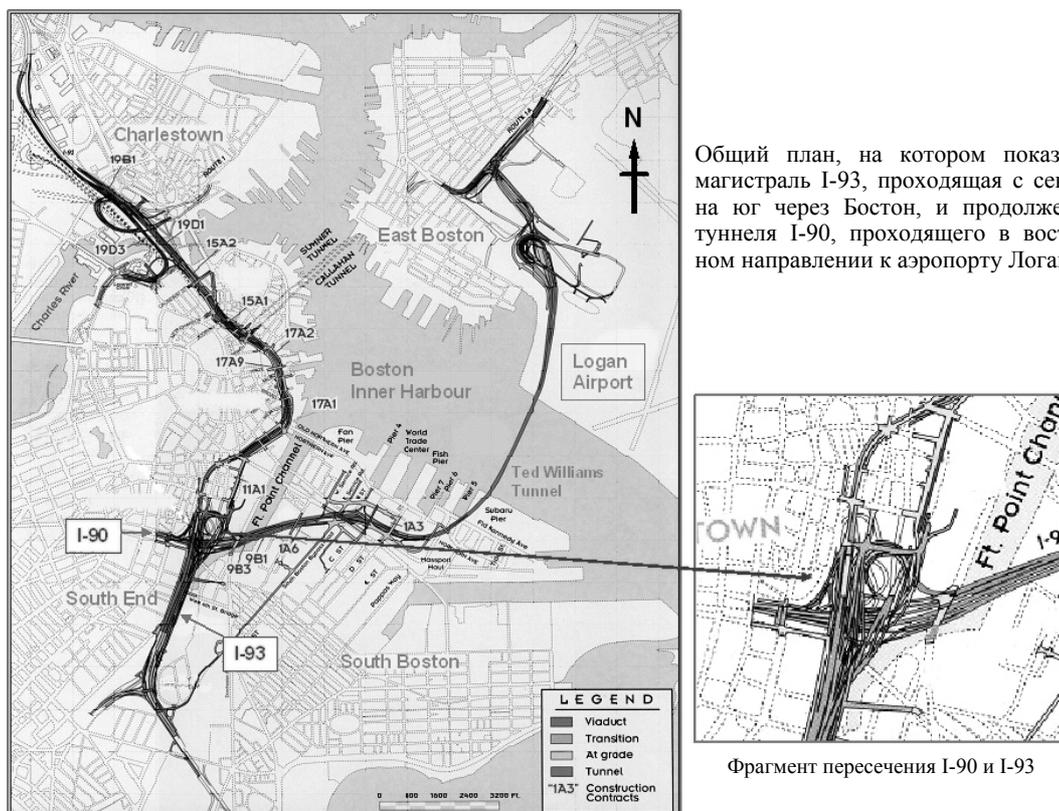
Быстрое развитие транспортной инфраструктуры во второй половине XX в. привело к перегрузке городских автомобильных магистралей, повышению уровня шума и загрязнения в больших городах во всем мире. Центральная магистраль (С/АТ) в Бостоне (штат Массачусетс), построенная в 1950-х гг., является одной из самых напряженных в США транспортных развязок. Чтобы разгрузить ее, был разработан проект С/АТ, согласно которому предполагалось переместить одну из главных автомобильных развязок под землю. Этот крупнейший в истории американского гражданского строительства проект получил название «большой котлован» [1]. Завершение проекта планируется в 2005 г., а некоторые участки магистрали уже эксплуатируются, что способствует более быстрому и удобному передвижению жителей города.

Основными условиями реализации проекта являлись избежание задержек в его выполнении и минимизация разрушений в процессе строительства. Поэтому наиболее эффективным решением этой задачи считалось применение нового подхода – использование домкратов. Данное решение привело к

тому, что строительство туннеля стало самым сложным проектом подобного рода в мировой строительной практике. По размерам проектируемый туннель в 10 раз превышал любой туннель в США. При его строительстве применялись инновации, разработанные британскими инженерами. Устройство туннеля при помощи домкратов (по оценкам экспертов, самая сложная часть бостонского проекта С/АТ) позволило более чем на 300 млн дол. сократить затраты на строительство, ускорить реализацию проекта и значительно уменьшить негативное воздействие на окружающую среду [2]. Но для претворения в жизнь первоначального проекта потребовалось около 10 лет напряженной работы коллектива инженеров-проектировщиков и строителей.

1. ПРОЕКТ

В ходе реализации проекта предполагалось создать новую подземную транспортную развязку между магистралями федерального значения I-90/I-93 (рис. 1). Для этого необходимо было соорудить туннели для многополосной автомобильной дороги под бостонской Южной станцией (South Station), где соединяются 7 железнодорожных путей, по которым



Общий план, на котором показаны магистраль I-93, проходящая с севера на юг через Бостон, и продолжение туннеля I-90, проходящего в восточном направлении к аэропорту Логан

Фрагмент пересечения I-90 и I-93

Рис. 1. Центральная магистраль г. Бостона

ежедневно проходят 400 поездов, перевозящих 40000 пассажиров.

Изначально предполагалось осуществлять устройство туннеля открытым способом. Такая традиционная технология использовалась, например, при строительстве первых туннелей лондонского метро под Fleet Street. Однако при таком подходе «затрагивались» наземные сооружения, поскольку непосредственно вдоль линии туннелей откапывали траншеи, которые засыпали после установки конструкций. Подобный подход не мог быть применен в Бостоне, где размер площадки строительства был ограничен, и потребовалось бы временно демонтировать 5 железнодорожных путей, что могло вызвать отрицательную реакцию управления железных дорог. Также потребовалась бы установка сложных систем контроля, включающих чувствительную волоконную оптику. Кроме того, пришлось бы постепенно строить небольшие отрезки туннеля, а для подходов к ним – глубокие узкие

рабочие траншеи между временно перемещенными железнодорожными путями. Это заняло бы много времени и потребовало принятия дополнительных мер безопасности.

Радикальным альтернативным решением явилось устройство туннеля при помощи домкратов (рис. 2). Предложенная концепция была исключительно проста: вместо перемещения железнодорожных путей предлагалось переместить конструкции. Предполагалось сначала построить отдельные секции туннеля, а затем установить их в нужное положение при помощи домкратов. При удачном ходе работ не требовалось ограничения скорости и изменения графика движения поездов. При реализации проекта удалось даже увеличить пропускную способность железной дороги при одновременном обеспечении безопасности.

Для руководства и координации проекта C/AT Massachusetts Turnpike Authority (MTA) привлекли компанию Bechtel/Parsons Brinckerhoff (B/PB). Компания Mott MacDonald (круп-

нейший специалист в области строительства туннелей), инженеры которой предложили альтернативное решение по устройству туннелей с помощью домкратов, в феврале 1991 г. выиграла тендер на проектирование. После продолжительной работы в январе 1998 г. контракт на строительство развязки получили совместные предприятия Slattery-Skanska, Interbeton, White и Perini (общая сумма – 400 млн дол., устройство туннеля – 140 млн дол.). Дальнейшие работы по устройству туннелей методом щитовой проходки проводили британские субподрядчики Edmund Nuttall и John Ropkins Ltd. Строительство пересечения магистралей, для которых устраивались туннели, завершилось в 2001 г., торжественное открытие состоялось 17 января 2003 г.

2. ОСНОВНЫЕ ПРОБЛЕМЫ

В ходе проекта С/АТ работы должны были производиться на территории, ограничен-

ной магистралями I-90 и I-93, системой железнодорожных путей и каналом Fort Point (рис. 3, 4). На первый взгляд площадка представляется достаточно большой (300×700 м), но проведение работ осложнялось тем, что они не должны были нарушать график функционирования железной дороги.



Рис. 2. Восточный туннель I-90 (верхняя граница туннеля расположена очень низко, над туннелем проходит поезд)



Рис. 3. Площадка строительства с восточной стороны, со стороны аэропорта Логан (место проведения работ ограничивается федеральной магистралью I-93 и железной дорогой). В правом нижнем углу видна последняя секция туннеля I-90)

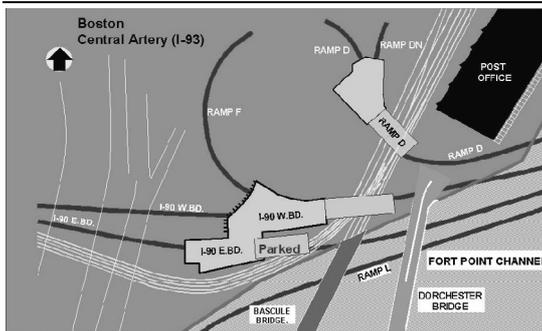


Рис. 4. Расположение трех туннелей, устраиваемых с применением домкратов. Показаны эстакада *D* и западная часть I-90 до отливки последнего блока восточного туннеля в котловане с распорками (первые две секции временно помещались под железнодорожное полотно в ходе сооружения западного туннеля I-90)

деревянных свай – результат 200-летнего освоения территории.



Рис. 5. Замораживание грунта под железнодорожным полотном

Эти ограничения были в основном сняты благодаря технологии устройства туннеля с использованием домкратов. Тем не менее не хватало места для сооружения сегментов туннеля в котлованах с распорками до начала применения домкратов. Было найдено уникальное решение этой проблемы: сочетание устройства котлованов с распорками при одновременном замораживании грунта (рис. 4 и 5). Строительство туннеля под железной дорогой осложнялось особым составом грунта: насыпь на слое слабой сжимаемой глины, где находились старые волнорезы, каменные фундаменты, железобетонные конструкции, засыпанная железная дорога и множество

3. УСТРОЙСТВО ТУННЕЛЯ ПРИ ПОМОЩИ ДОМКРАТОВ

Туннели, устраиваемые при помощи домкратов (в особенности длинные), обычно состоят из нескольких элементов, соединенных с помощью промежуточных домкратных станций. При этом процесс устройства туннеля напоминает движение гусеницы (рис. 6). Это способствует уменьшению общего усилия на домкрат, поскольку его движение зависит от максимального усилия, прикладываемого для вдавливания одного блока. Секции туннеля должны были не только выдерживать усилия от домкратов, но и обладать высокой устойчивостью, поскольку от этого зависело

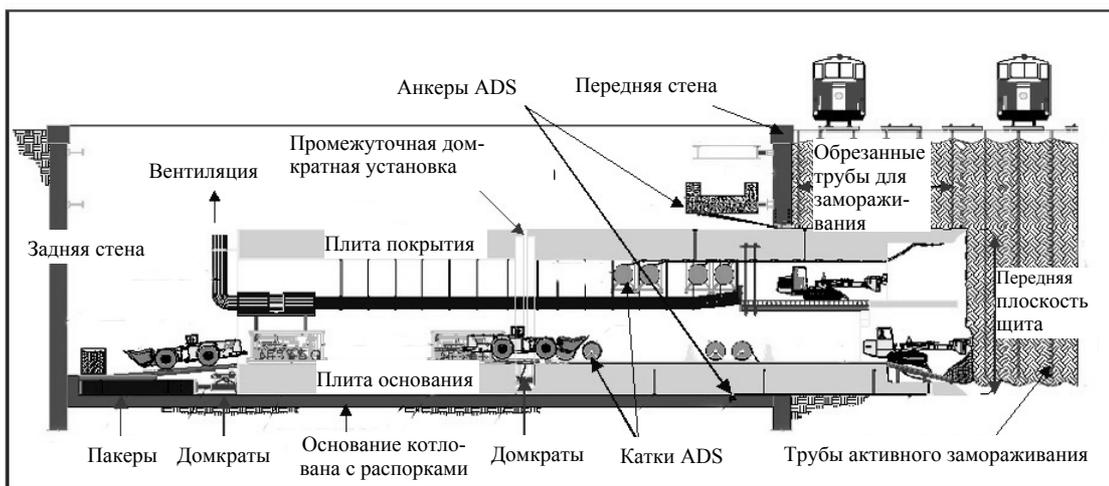


Рис. 6. Продольный разрез туннеля, устраиваемого при помощи домкратов

первоначальное выравнивание туннеля.

Передний фронт откопки в начале туннеля удерживается щитом. В условиях слабого грунта плоскость щита делится на несколько секций, а лидирующие края щита входят в грунт, обеспечивая его необходимое крепление. Откопка в каждой секции ведется при помощи ручного инструмента и небольших механизмов.

Перед применением домкратов все секции туннеля устанавливаются на основание с распорками и выравниваются. Устройство туннеля продолжается до тех пор, пока все его секции не будут установлены в нужное положение. Это обусловлено риском увеличения давления грунта на неподвижную часть туннеля в случае продолжительного перерыва во вдавливании, что могло заблокировать туннель. Однако на данной площадке даже в котловане с распорками нельзя было одновременно разместить все 6 секций западного и восточного туннелей I-90. Было принято решение использовать весь котлован для размещения секций восточного туннеля I-90. Последний модуль перемещался с западной стороны на восточную, и процесс применения домкратов не прерывался. Тем не менее нижняя часть западного туннеля строилась с запаздыванием, поскольку перед ее опусканием в котлован с распорками его следовало освободить от последнего блока восточного туннеля. Замораживание грунта способствовало одновременному строительству обоих туннелей магистрали I-90.

4. ИННОВАЦИИ

Согласно альтернативному проекту, под действующей железной дорогой предполагалось соорудить при помощи домкратов три масштабных туннеля общей длиной более 240 м, весом 70000 т.

Котлованы с распорками, в которых сооружались секции туннеля, – одни из самых больших конструкций, удерживающих грунт, которые строились в США, а использованная технология и геометрия относятся к образцам передового мирового опыта.

Котлованы глубиной 25 м должны были иметь минимальные горизонтальные распорки, так как по ним перемещали туннели. Для

этого использовали временные стальные распорки, а при невозможности их применения из-за сложной геометрии котлована сооружали стены такой жесткости, чтобы они могли выступать в качестве консоли по всей высоте котлована. На рис. 3 видно, что над секцией восточного туннеля I-90 нет распорок.

Схема с применением домкратов включала и другие инновации. Одними из самых существенных были полное замораживание грунта под железнодорожным полотном и разработка специальной anti-drag системы. Замораживание грунта (крупнейшая операция подобного рода, проводимая под действующей железной дорогой) способствовало преобразованию потенциально неустойчивых слоев грунта с различным уровнем сжимаемости в прочный массив (рис. 6 и 8). Выемка деревянных свай, находящихся в замороженном состоянии, осуществлялась достаточно просто. Замораживание грунта значительно облегчило прохождение туннелей через передние стены котлованов с распорками.

Эта стадия строительства имела важное значение, поскольку большая скважина должна была пройти сквозь переднюю стену котлована с распорками таким образом, чтобы передний щит лидирующей секции каждого туннеля проходил вперед и удерживал грунт. Поскольку этот грунт также является основанием сооружений транспортной инфраструктуры (в данном случае – железной дороги), проходка туннеля обычно ведется с использованием наклонной подпорной стенки. Благодаря замораживанию грунта этот недостаток был устранен. Подпорные стенки могли устанавливаться под прямым углом к направлению «поддомкрачивания», и скважина выполнялась за один цикл.

Существовала опасность фильтрации загрязненной воды через водопроницаемые отложения над слоем глины. При замораживании грунта эта проблема исключалась, уменьшался объем ручных работ, создавались более безопасные и благоприятные условия работы по фронту туннеля. Несмотря на очевидные преимущества, технология замораживания грунта сначала не была принята. Возникали сомнения по поводу масштаба замораживания и вполне обоснованное беспо-

койство по поводу сильного пучения грунта при широкомасштабном применении данной технологии. И хотя проектировщики предпочитали эту технологию, на стадии проектирования были использованы традиционные методы стабилизации грунта – армирование и инъектирование. Но на ранней стадии строительства прибегли к технологии замораживания.

Благодаря замораживанию грунта появилась уникальная возможность поместить первые две секции восточного туннеля I-90 под железнодорожное полотно. Это способствовало решению проблемы стесненности площадки строительства (см. рис. 4). Вследствие стабилизации грунта за счет замораживания и осторожного использования локальных нагревательных элементов вблизи и внутри стен туннеля исключался риск блокирования туннеля в ходе продолжительного «поддомкрачивания». Частично установленные секции могли оставаться в нужном положении. Следовательно, уже необязательно было одновременно устанавливать все блоки восточного туннеля, что позволило избежать столкновения с западным туннелем. Комбинированный котлован с распорками мог использоваться для одновременного сооружения восточного и западного туннелей. Устойчивость грунта позволяла увеличить размеры секций щита, передняя плоскость которого уже могла не использоваться для удержания грунта. Это позволило применить для экскавации большие машины, значительно уменьшить объем ручного труда на передней поверхности щита, облегчить и обезопасить прохождение препятствий.

В системе «антидраг» (ADS) использовались 1000 стальных тросов на покрытие каждого туннеля (см. рис. 6 и 7). Основная задача ADS состояла в отделении туннеля от находящихся над ним грунта и сооружений инфраструктуры. Благодаря этому удалось остановить боковое перемещение грунта при использовании домкратов. Система ADS большой мощности также обеспечила контроль стыковки туннелей при помощи дополнительных тросов, проходящих под туннелями. Тросы системы ADS крепились к барабанам в покрытии и на основании туннелей и разматывались по мере продвижения. По мере

того как отдельные секции туннелей устанавливались со скоростью 1-2 м в день, над ними не прекращалось движение поездов, при этом поддерживался необходимый уровень безопасности движения.

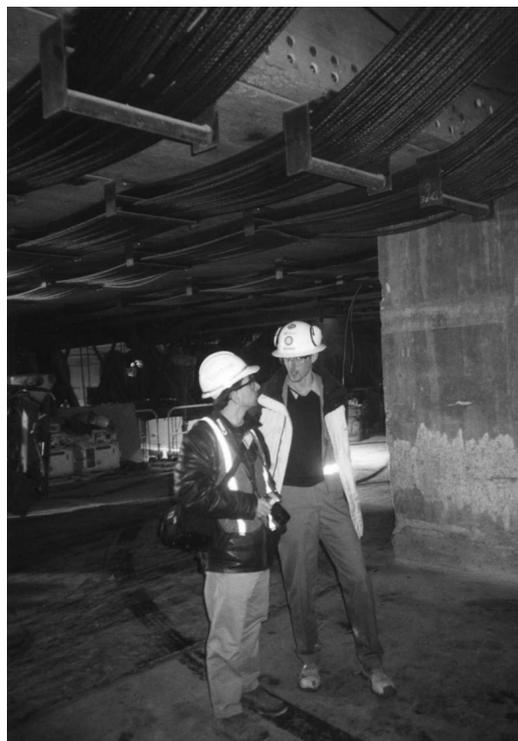


Рис. 7. Верхний уровень щита туннеля (показаны тросы системы ADS, расположенные непосредственно за выемками выхода)

5. КОТЛОВАНЫ С РАСПОРКАМИ

В процессе устройства туннеля важно было обеспечить должный уровень безопасности и точную стыковку туннелей, а также не нарушить график функционирования железной дороги. Для этого требовалось точно спроектировать и устроить котлованы с распорками (см. рис. 3 и 4). Несмотря на то что замораживание грунта под железнодорожным полотном привело к его стабилизации, связанные с этим перемещения грунта (до 300 мм в боковом и вертикальном направлениях) могли негативно повлиять на железнодорожные конструкции и подпорные сооружения котлованов с распорками. На рис. 9, 10 показано расположение стен котлованов на линии I-90.



Рис. 8. Устройство западного туннеля на I-90 с восточной стороны железной дороги



Рис. 10. Восточный котлован с распорками I-90

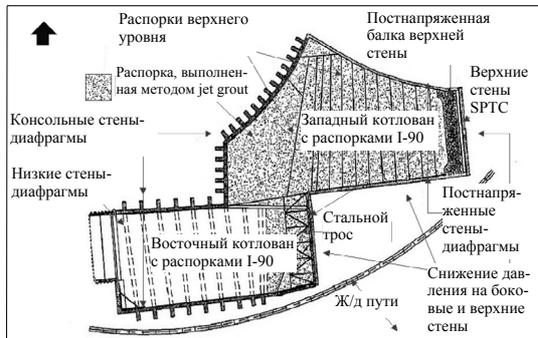


Рис. 9. Схематическое изображение котлованов

Согласно стандартам проекта, вертикальные подпорные стены должны были устанавливаться с вертикальным шагом распорок не более 3,6 м. Однако из-за необходимости сооружения и установки большеразмерных железобетонных коробчатых конструкций для туннелей это расстояние увеличилось до 20 м. Ограниченное пространство для ведения работ и сложная геометрия проекта потребовали разработки инновационных систем подпорных стен.

Для упрощения контроля во время щитовой проходки, а также обеспечения соответствующей пассивной поддержки верхние стены трех туннелей (эстакада D, западный и восточный туннели I-90) изготавливались при помощи устройства лидирующих свай (система SPTC). Боковые стены выполнялись в виде преднапряженных большеразмерных стенодиафрагм. В тех местах, где выполнение распорок верхних стен было нецелесообразным (например, в задних стенах западного туннеля I-90, а также в боковых стенах восточного туннеля I-90), устраивались стенодиафрагмы Т-образной формы с консолями. Из-за ограниченной прочности бостонской голубой глины необходимо было решить вопрос обеспечения адекватного пассивного отпора этих стен методом jet grouting и устройства низких стен в грунте. Рассматривалось также улучшение грунта с помощью известняковых колонн, но этот способ не был принят.

Котлованы с распорками должны были выдерживать нагрузку от железной дороги и туннелей (по прогнозам, величина усилия на домкраты превышала 24000 т). Для их успешного устройства необходимо было оценить риски на стадии проектирования и строительства.

Инъекции раствора методом jet grouting привело к значительным деформациям и давлению грунта на стенодиафрагмы [3]. Тем не менее последние хорошо противостояли боковым деформациям на глубине во время откопки котлованов с распорками. В то же время низкие стенодиафрагмы, стоимость

установки которых была ниже, подверглись большим деформациям, поскольку между ними и боковыми стенами котлованов не было плотного контакта.

Больше всего на стены повлияло горизонтальное перемещение грунта в результате его замораживания. На рис. 11 показаны кумулятивные воздействия на переднюю стену эстакады *D*, а также прогнозируемые и реальные нагрузки, предшествующие замораживанию грунта. Во избежание перегрузки этих стен, а также верхних подпорных сооружений в котлованах с распорками устанавливали гидравлические домкраты, а между котлованами и железнодорожным полотном пробуривали скважины для снятия напряжений (рис. 12).

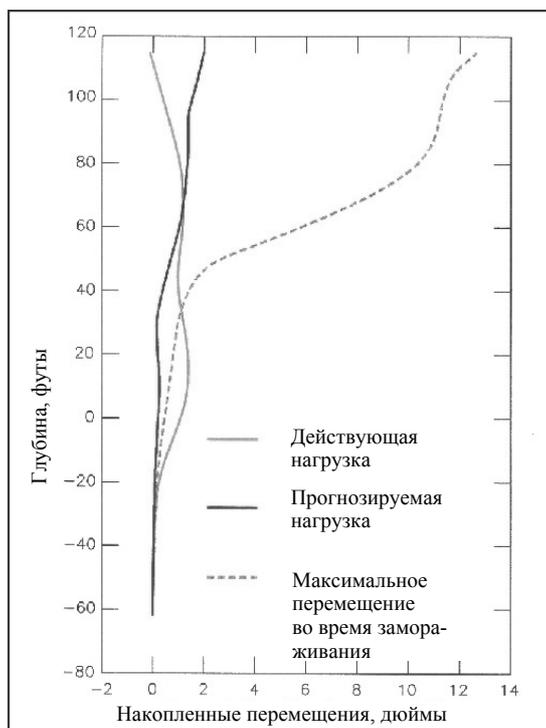


Рис. 11. Эстакада *D*. Деформации верхней стены

6. РАБОТА КОЛЛЕКТИВА

Благодаря слаженной работе проектировщиков, подрядчиков, региональных и федеральных властей, в том числе представителей железнодорожного ведомства, проект по устройству туннелей при помощи домкратов был успешно осуществлен. Работая в тесном

сотрудничестве с представителями МТА, проектировщики предложили альтернативный метод устройства туннеля при помощи домкратов, представили проект на рассмотрение Федерального ведомства железных дорог, которое взяло на себя ответственность за его осуществление. Процесс разработки и утверждения проекта занял 18 месяцев. После окончательного утверждения проекта потребовалось представить детальный план работ для получения тендера на строительство. После получения контракта проектировщики работали в тесном контакте с группой подрядчиков.

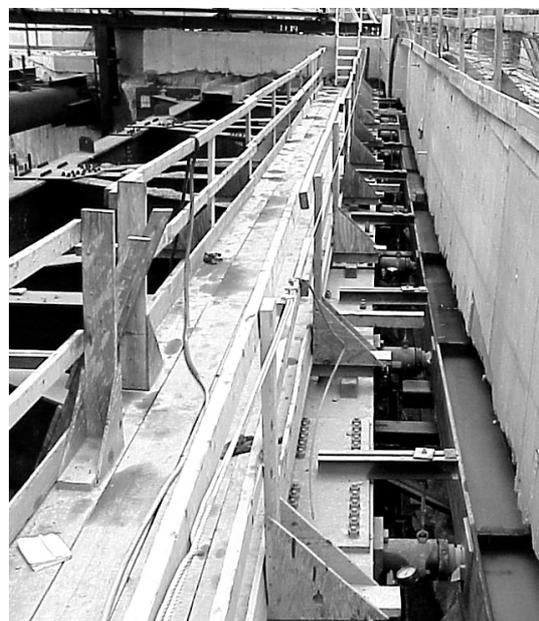


Рис. 12. Система по снятию напряжений с верхних стен (горизонтальное давление замороженного грунта контролируется тем, что допускается перемещение подпорной стенки путем использования гидравлических домкратов)

Был сформирован координационный комитет, куда вошли представители всех сторон. Комитет проводил еженедельные собрания, на которых обсуждался ход работ, рассматривались возможные риски, и осуществлялся контроль воздействия строительства туннелей на железную дорогу. В ходе работ в результате пучения замороженного грунта возникли значительные его перемещения, что привело к перемещению железнодорожных путей на 300

мм в горизонтальном и вертикальном направлениях. Перемещения развивались в течение нескольких месяцев, и благодаря небольшой скорости их развития удалось вовремя укрепить пути и избежать аварий. То же самое можно сказать об осадках, возникших в процессе оттаивания.

Деформация, вызванная пучением грунта, хотя и превышала прогнозируемую величину, но оказалась допустимой. Представители железнодорожного ведомства с пониманием отнеслись к происходящим процессам и остались довольны конечным результатом.

7. ПРЕИМУЩЕСТВА ДЛЯ ГОРОДА

Во время строительства туннеля увеличилась нагрузка на другие транспортные магистрали, и многие владельцы машин были вынуждены пользоваться общественным транспортом. Однако благодаря использованию домкратов при устройстве туннеля удалось не только обеспечить безопасное функционирование железной дороги, но и параллельно со строительством туннеля выполнить ее электрификацию, что способствовало повышению эффективности железнодорожного сообщения (см. рис. 3, 8).

По сравнению с традиционным открытым методом устройство туннеля при помощи домкратов способствовало уменьшению объема откопки, поскольку значительный массив грунта, находящегося непосредственно под железнодорожным полотном, оставался на месте. Это значительно уменьшило негативное воздействие на окружающую среду, так как позволило исключить провоз через город опасных загрязняющих веществ.

8. УСПЕХ И ПРИЗНАНИЕ ПРОЕКТА

Масштабность, сложность и инновационность проекта по устройству туннеля при помощи домкратов привлекли внимание инженеров, ученых и мировой общественности.

Была признана заслуга британских гражданских инженеров, которые кардинально улучшили транспортную структуру Бостона (огромные котлованы с распорками сами по себе требовали ряда инноваций). В 2000 г. они получили Большой приз за выдающиеся инженерные заслуги, присуждаемый Американским советом инженеров-консультантов. Кроме того, в 2002 г. была получена награда MacRobert, присуждаемая Королевской инженерной академией, а также выигран международный проект BCIA и BCCB для крупнейшей консультирующей компании года. В 2003 г. проект получил международные награды за качество в строительстве и за достижения в строительстве, ASCE и CERF (награду Чарльза Панкова за выдающиеся инновации).

Национальное и международное признание проекта способствовало росту популярности способа устройства туннеля при помощи домкратов среди клиентов, что было важно, поскольку за клиентом всегда остается последнее слово. Представитель Министерства транспорта США Энтони Касерта так прокомментировал данный проект: «Прокладка туннеля при помощи домкратов общей стоимостью 15 миллиардов долларов была самой сложной частью строительства Центральной магистрали в Бостоне. Для успешного осуществления проекта без риска и опасности для нормальной работы железной дороги потребовались инновационное, нестандартное мышление, а также слаженная работа инженеров – специалистов в разных областях. Это было смелое и отважное решение, позволившее создать инженерное чудо. Стоит также отметить качество и высокий уровень строительных работ: проект осуществлялся согласно заданному плану, без дополнительных затрат».

В заключение автор выражает благодарность своим коллегам за тот вклад, который они внесли в осуществление проекта. Фотографии (см. рис. 3, 5 и 10) предоставлены www.bigdig.com.