

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА НАБЛЮДЕНИЙ ПУТЕМ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫХ МОДИФИКАЦИЙ

А. ДЖ. ПАУДЕРХЭМ – компания «Mott MacDonald Group», г. Лондон, Великобритания.

Применение метода наблюдений путем последовательных модификаций помогает преодолеть технические и контрактные ограничения и добиться экономии времени и средств без ущерба для качества.

Метод наблюдений – это мощный инструмент, который может способствовать значительной экономии средств при сохранении удовлетворительного уровня безопасности. Этот метод также помогает расширить знания в сфере гражданского строительства, однако область его применения все еще очень ограничена.

Выход из сложившейся ситуации предлагает метод *последовательных модификаций*. Особые задачи метода наблюдений заключаются в экономии средств и времени при обеспечении приемлемого уровня безопасности. Пионером в применении данного метода стал Карл Терцаги, а теоретические принципы были представлены Р. Б. Пеком в его Ренкинской лекции 1969 г. [1]. Он вывел превосходную основу для понимания общей философии метода и его основных требований. Пек предложил два общих подхода к применению метода: *ab initio* (с самого начала) и лучшее решение проблемы. Первый подход заключается в сознательном применении метода наблюдений с самого начала проекта, тогда как в случае второго подхода метод применяется при непредвиденном возникновении неблагоприятных ситуаций во время строительства. Пек не только обозначил границы применения метода, но и отметил, что его полный потенциал еще отнюдь не осознан. В 1985 г. он вновь поднял вопрос о неверном

применении метода, повторно описав метод наблюдений как одно из самых мощных орудий в арсенале гражданского строительства [2].

В этой работе рассматриваются 4 примера использования метода наблюдений с акцентом на развитии и применении подхода последовательных изменений [3]. Такой подход является по своей сути очень гибким и может быть применен к обоим типам, выведенным Пеком [1].

Применение метода наблюдений через последовательные модификации позволяет преодолеть препятствия технологического и контрактного характера, а также снизить обеспокоенность всех участников проекта, связанную с сопутствующими рисками. Такие препятствия до сих пор мешали более широкому применению метода наблюдений. Таким образом, последовательные изменения предоставляют возможность для более широкого использования метода.

Пек установил 8 шагов, выполнение которых необходимо для полноценного применения метода наблюдений [1]. При этом он особо подчеркнул важность геологии, необходимость оценки развития наиболее вероятных условий и неблагоприятных отклонений от этих условий. Предварительное планирование совершенно необходимо для борьбы с любыми предсказуемыми отклонениями значительного масштаба от наиболее вероятных состояний. В этой связи появляется необходимость тщательного прогнозирования, так как никто не обладает даром совершенного предвидения.

© A. Powderham, 1998

Впервые статья опубликована в 1998 г. в юбилейном издании «Civil Engineering Practice» в честь 150-летия Британского общества гражданских инженеров.

ния. В работе [4] Пек предупреждает о непредвиденных рисках, подчеркивая необходимость достоверности и гибкости. Применение метода наблюдений через последовательные изменения позволяет удовлетворить оба эти требования, что способствует снижению рисков и максимизации возможностей.

Метод наблюдений предполагает большую долю проектирования, чем при обычном подходе, когда существует единый фиксированный проект. Как минимум, необходимо выполнить базовый проект и серию вспомогательных проектов, чтобы рассмотреть возможные непредвиденные обстоятельства, которые могут проявиться во время проведения строительных работ. Согласно Пеку, базовый проект основывается на наиболее вероятных условиях строительства [1]. Эти условия, относящиеся к природным воздействиям, виду и свойствам затрагиваемых грунтов, оцениваются на основании наиболее разумной интерпретации инженерно-геологической ситуации на площадке. В подходе последовательных изменений вся существенная информация постепенно синтезируется через цепь обратной связи. Таким образом оцениваются общие действия, включая совместную работу грунта и основания, технологию строительства, взаимодействие и командную работу участников проекта. Цель применения метода наблюдений через последовательные модификации заключается во внесении постепенных изменений в проект по ходу проведения строительных работ, что приводит к экономии средств и времени. И хотя этот подход требует увеличения объема дополнительного проектирования, он может принести максимальную пользу.

Проектирование включает определение менее консервативных (по сравнению с обычными) параметров проекта. Оно включает также и оценку факторов, плохо поддающихся количественному определению (таких, как нелинейные, трехмерные и зависящие от времени эффекты). Для определения подобных факторов можно использовать такие мощные аналитические инструменты, как метод конечных элементов или метод конечных разностей. Однако анализ не может заменить инженерное суждение [5, 6]. Возможный характер разрушений должен быть

тщательно оценен и должным образом контролирован – особенно тех разрушений, которые возникают внезапно или неустойчивы, а также тех, которые могут привести к постепенному обрушению. Основным достоинством метода наблюдений является то, что он может выйти за рамки традиционного проектирования путем оценки обратной связи с реальными условиями. Вышеупомянутые факторы, плохо поддающиеся количественному определению, обязательно проявятся в реальности.

Хотя чрезвычайно важным является определение потенциального влияния этих факторов на процесс строительства, начинать работы на площадке, имея проект, основанный исключительно на благоприятном варианте развития событий, неприемлемо. Любые предложения по внесению изменений в существующий проект, особенно во время строительства, вызывают озабоченность всех заинтересованных лиц. Обычно эти изменения касаются факторов безопасности, уровней риска и требований по срокам. Проект, основанный на развитии наиболее вероятных обстоятельств, может усугубить эти опасения. Поэтому обычно начинают строительство с более консервативным проектом, удовлетворяющим требованиям по безопасности всех вовлеченных в строительный процесс лиц и организаций. Такой подход позволяет позже применить последовательные модификации, когда изменения в проект вносятся постепенно в зависимости от реальных условий на стройплощадке.

Оценка наиболее вероятных условий важна, так как она обозначает возможный диапазон консервативных решений и потенциальные возможности для экономии средств. Однако, так как обратная связь при строительстве и применении метода наблюдений еще не достигнута, такая оценка должна опираться на инженерное суждение. Если оценка консервативна, можно достичь большей экономии путем применения прогрессивных модификаций. Если обоснование было неконсервативным, то использование на начальном этапе приемлемо консервативного проекта снижает необходимость применения экстренных мер безопасности, которые можно легко контролировать. Использование метода последова-

тельных изменений в различных областях позволяет добиться существенной экономии на этапе последующего проектирования и минимизировать или исключить возникновение непредвиденных ситуаций. Наличие обратной связи благодаря наблюдениям гарантирует, что решения принимаются на основе максимально полной информации, полученной при непосредственном ведении строительных работ.

МЕТОД ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫХ МОДИФИКАЦИЙ

Метод наблюдений концентрируется на изменениях проекта во время проведения строительных работ и устанавливает рамки для управления сопутствующими рисками. Поэтому, естественно, возникают вопросы надежности и безопасности. В современной строительной практике упор делается на командный подход [7]. Кроме того, надо принимать во внимание весомые политические факторы и вопросы окружающей среды. Удовлетворение требований всех сторон, касающихся безопасного производства работ, и демонстрация возможности адекватного контроля состояния проекта стали неотъемлемыми принципами практики строительства и проектирования. Безопасность является основным элементом, кроме того, общим требованием является высокая степень уверенности в выполнении проекта и реальности сроков.

К сожалению, метод наблюдений часто ассоциируется с низким уровнем безопасности. Это усугубляется сомнениями по поводу стоимости и задержек, вызванных непредвиденными мерами. Такое восприятие может привести к исключению любых возможностей применения этого метода. Подход последовательных изменений призван развеять подобные сомнения. Основные принципы подхода заключаются в следующем:

начинать строительство следует с проектом, предусматривающим уровень риска, приемлемый для всех сторон;

нужно выдерживать или повышать приемлемый уровень безопасности;

вносить любые изменения с позиций установленного уровня безопасности следует

через шаги последовательного анализа фактически отслеживаемой ситуации.

Данная философия проиллюстрирована на рис. 1. Вертикальная плоскость в точке O представляет современный уровень знаний. Отношение между риском и стоимостью показано кривой BAC . Линия AD_1 – это линия постоянного риска и снижения стоимости, которая представляет приемлемый для всех сторон уровень безопасности. Точка C соответствует очень консервативной (высокой по стоимости) ситуации, тогда как точка B – это высокий риск и неприемлемая безопасность. В данном примере точка B отражает низкую стоимость или неадекватную поставку ресурсов. Во время строительства в зоне AB иногда возникают ситуации, требующие корректирующих действий. Наглядным примером может служить применение подхода «лучшее решение проблемы» – линия BD_2 , где точка D_2 представляет дополнительную стоимость коррекции сложившейся ситуации. Однако строительство должно лежать в зоне AC с хорошим потенциалом к экономии. Но реализация данного потенциала зависит от способности поддерживаемой обратной связи демонстрировать соблюдение приемлемого уровня безопасности, гибкости при внесении постепенных улучшающих изменений в проект и от того, перевешивает ли положительный эффект дополнительные расходы, необходимые на внедрение метода.

Возможность максимально сократить расходы появляется при проведении строительных работ. Это относится к временным работам или последовательности всех работ, хотя существенная экономия может быть получена при основном строительстве, особенно за счет исключения крупных защитных мероприятий.

В трех исторических примерах, приведенных в данной работе: тоннель под Ла-Маншем, Лаймхаус Линк и стена в грунте в Хитроу – применение подхода последовательных модификаций принесло экономию средств за счет улучшения проекта (по оси CD_1). Основная задача заключалась во введении таких изменений, которые сэкономили бы время и средства при соблюдении требований безопасности.

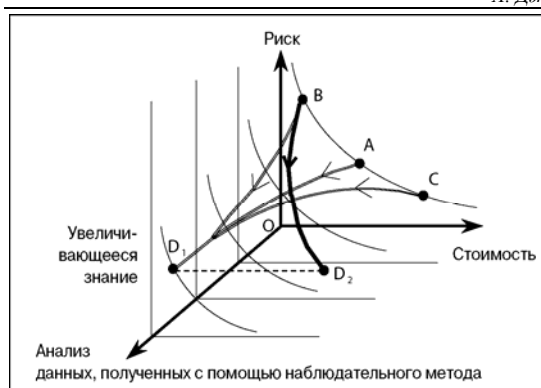


Рис. 1. Наблюдательный метод – знания, риск, стоимость

История Мэншен-Хаус иллюстрирует применение подхода «лучшее решение проблемы». Здесь ставилась задача восстановить уверенность владельцев здания путем четкого контроля безопасности. Основным требованием было – избежать нанесения ущерба зданию. Подход последовательных изменений позволяет продемонстрировать обеспечение приемлемого уровня безопасности при избежании, в идеале, возникновения непредвиденных обстоятельств. При подходе «лучшее решение проблемы» подобные обстоятельства

требуют внесения изменений в проект. Их реализация неизбежно влечет потерю времени и средств, но это необходимо для обеспечения требуемого уровня уверенности в возможности безопасного ведения работ на площадке. Применение постепенных модификаций в этой ситуации позволяет избежать поспешного внесения изменений в проект, когда для этого нет достаточных знаний. Преждевременные изменения также могут неблагоприятно сказаться на безопасности строительства (лечение становится вреднее, чем сам недуг) или, в лучшем случае, привести к излишним тратам времени и средств.

СТРОИТЕЛЬСТВО ТОННЕЛЯ ПОД ЛА-МАНШЕМ

Метод наблюдений применялся для снижения количества стальных конструкций раскрепления, временно установленных на сплошной свайной стенке в трех различных местах со сходными грунтовыми условиями. Метод был опробован на восточном склоне холма Касл Хилл, затем положительный эффект последовательных изменений был закреплен применением метода на холме

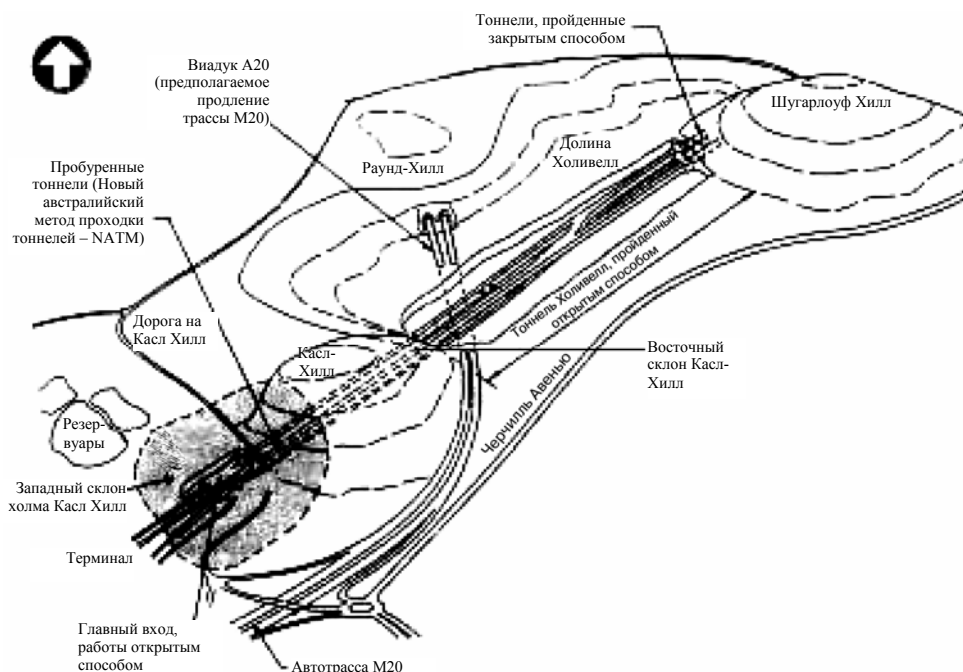


Рис. 2. Общий план поверхностных работ при строительстве тоннеля под Ла-Маншем – участок от восточного склона Касл Хилл до Шугарлоуф Хилл

Шугарлоуф Хилл и западном склоне холма Касл Хилл.

Инженерно-геологические условия. Две площадки – на западном склоне холма Касл Хилл и Холивелл – расположены на небольшом склоне в основании эскарпа Норт Даун. Три небольшие долины разрезают эскарп, разделяя Касл Хилл, Раунд Хилл и Шугарлоуф Хилл (рис. 2). Эскарп, склон которого имеет примерный наклон 1:3, состоит из нижнего мела, сверху которого находится более плотный основной слой среднего мела. Нижний мел – глауконитовый мергель и известковая кирпичная глина – чередуются под эскарпом. Местный наклон составляет примерно 1° к северо-востоку и увеличивается у эскарпа из-за снятия напряжения. Известковая кирпичная глина чрезвычайно переуплотненная и высокопластичная. Хотя подобная глина обычно очень плотная и тугая, процесс выветривания привел к значительному снижению ее прочности у поверхности. Есть данные о потере устойчивости в местах обнажения породы.

Уровень грунтовых вод в долинах зависит от инфильтрации воды в основании мелового эскарпа. Вдоль линии обнажения глауконитового мергеля в основании эскарпа находятся родники.

Западный Касл Хилл располагается в массе смещенного мелового мергеля, под которым залегают слои известковых кирпичных глин. У этих глин отмечается очень низкая сопротивляемость скольжению вдоль поверхностей, которые могут существовать внутри толщи породы из-за тектонических воздействий или как результат разности снятия напряжений в основании холмов. Такая неустойчивость привела к оползням восточного Касл Хилл примерно 10000 лет назад. В современных условиях это место считается в целом устойчивым.

Внедрение изменений, касающихся раскрепления. При устройстве всех вертикальных стен котлованов использовались смежные железобетонные набивные сваи. Требования к выправке железнодорожного пути и строительные требования привели к большим изменениям геометрических форм устройства свайных стен. В основном применялась прямоугольная форма, но устраивались также и круглые шахты, которые использовались как

рабочее пространство для тоннелепроходочных машин.

Работы по устройству свай начались в мае 1988 г. на восточном Касл Хилл, продолжались на Шугарлоуф Хилл и завершились на западном Касл Хилл. Основная выемка грунта и строительные работы по прокладке тоннеля проходили в том же порядке с июня 1988 г. Заключительная фаза работ началась в западном Касл Хилл в мае 1989 г. Решались различные проектные неопределенности, касающиеся:

грунтовых условий (особенно известняковых кирпичных глин и их тенденций к размягчению и разбуханию во время проведения строительных работ);

устойчивости эскарпа;

боковых нагрузок, а также влияния методов строительства и последовательности производства работ на площадке.

В дополнение к сказанному существовали ограничения по глубине заложения свай для сведения к минимуму разности осадок, влияющих на устойчивость железнодорожного полотна, кроме того, отсутствовали нужные данные.

Восточный Касл Хилл. Прокладка тоннеля проходила под холмом Касл Хилл с востока на запад с концентрацией строительных работ в порталах открытой проходки восточного склона Касл Хилл. Использовался новый австралийский метод проходки тоннелей (NATM). Уменьшение количества элементов временного раскрепления сплошной свайной стены имело три положительных момента: экономия материалов, увеличение рабочего пространства и экономия времени. Оригинальный проект был осуществлен на восточном склоне Касл Хилл (рис. 3). Проектом предусматривалась схема строительства «снизу вверх», начиная от дна выемки с тремя уровнями временных распорок. Откопка началась со служебного тоннеля, затем – два тоннеля в южном и северном направлениях. Только после устройства раскрепления для свай временного тоннеля возможность уменьшения количества распорок стали рассматривать всерьез. Внедрение метода наблюдений через последовательные изменения началось с предварительной оценки грунтов путем их визуального обследования, а также измерения

нагрузок на элементы временных распорок и отклонения стены.

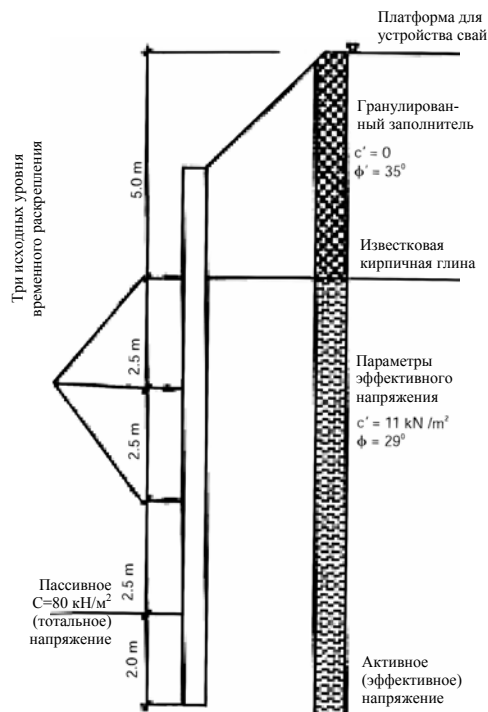


Рис. 3. Типичное устройство временного раскрепления стены на восточном склоне Касл Хилл

Для подтверждения возможности уменьшения количества распорок был разработан менее консервативный проект. В нем использовались пределы кратковременной прочности грунта с применением плоских деформаций. Хотя трехмерный арочный эффект в грунте создает дополнительный запас безопасности, этот запас было решено не использовать. Исходное требование при постепенных изменениях – установить приемлемую основу для применения метода. Такая оценка должна определить адекватную экономию при соблюдении всех мер безопасности. Первой задачей было убрать нижний ряд распорок. Применялся совмещенный анализ с использованием эффективных и тотальных напряжений [3]. При этом применялись параметры, приведенные на рис. 3. Анализ показал, что можно убрать нижний ряд распорок, используя кратковременный пассивный отпор грунта. При использовании только верхнего ряда распорок коэффициент безопасности равнялся

1,3. Данная величина является очень низкой для совмещенного анализа, особенно с учетом действия пассивного отпора грунта на малые секции заглубления. Это выводит проект за общепринятые рамки и практику.

При оценке влияния наиболее неблагоприятных условий необходимо учитывать величину и природу пассивного отпора грунта. Эта величина зависит от процесса трещинообразования и скорости разупрочнения грунта, а также рассеивания отрицательного давления поровой воды. С учетом этого была произведена быстрая откопка и устроена плита из бетонного раствора. В сильно переуплотненных глинах траектория напряжения при вертикальном снятии нагрузки ведет к развитию пассивного предельного состояния. Поэтому для мобилизации больших величин пассивного отпора не требуются значительные боковые перемещения стены.

Необходимо избежать появления хрупкости, для чего следует ограничить отклонения стены и таким образом удерживать деформации грунта на низком уровне. Измерения подвижек стены и обратный анализ нагрузок на распорки показали, что средняя деформация грунта составляла менее 0,2%. Можно также было использовать факт возникновения гибких, а не хрупких деформаций вследствие пассивного отпора, в особенности в условиях чрезвычайно кратковременного воздействия максимального напряжения. В этом случае, однако, отсутствовали какие-либо вторичные благоприятные факторы. Жесткие ограничения были наложены на временные рамки выемки грунта и формирование постоянной боковой крепи на уровне породы. Чтобы соорудить плиту основания вовремя, осуществлялось предварительное усиление путем устройства усовершенствованного мата из раствора.

Прогрессирующей аварийной ситуации удалось избежать путем:

установки тяжелей на уровне верхних распорок для предотвращения вращения на среднем уровне раскрепления;

регулирования длины захваток во время разработки грунта на уровне породы и заливки мата из раствора 5-метровыми участками.

Любые модификации проекта при значительных негативных отклонениях от прогно-

зируемых величин сводились бы к установке распорок на нижнем уровне раскрепления при подвижках стены сверх ожидаемых и увеличению длины захваток при подвижках меньше ожидаемых.

Критериями оценки являлись подвижки распорок и стены, причем последние рассматривались как наиболее способствующие возникновению аварийной ситуации. Фактические усилия в распорках оставались на очень низком уровне и, в целом, не превысили 15% от проектных усилий. Подвижки стены, измеренные с помощью простой съемки с применением ленточного экстензиометра и теодолита, находились в диапазоне от 3 до 7 мм, что намного ниже максимально допускаемой величины в 15 мм.

Наблюдения показали также, что можно модифицировать проект путем снятия ограничений на максимально допустимую длину захваток. Это преимущество не было реализовано на объекте восточный Касл Хилл, так как к моменту внедрения метода наблюдений строительный процесс находился уже на довольно продвинутой стадии. Тем не менее, удалось снизить объем временных металлоконструкций приблизительно на 20 % (около 250 тонн).

Шугарлоуф Хилл. Для достижения максимального эффекта от применения метода наблюдений на этом объекте проект был модифицирован путем выбора метода строительства «сверху вниз» вместо «снизу вверх». Эта модификация обеспечила, как минимум, два преимущества. Во-первых, сооружение плиты перекрытия крыши позволило отказаться от использования одного уровня распорок. Во-вторых, что намного важнее, появилась возможность реагировать на наихудший вариант развития событий путем устройства соединения со стеной, рассчитанного на восприятие изгибающего момента во время наиболее рискованного этапа откопки до уровня породы. Это позволило кардинально уменьшить риск: от прогрессирующего обрушения при увеличенной длине захваток до вероятностного возникновения ограниченного перенапряжения элементов конструкций.

Решение об использовании метода наблюдений было принято по той же причине, что на площадке строительства восточный

Касл Хилл. Запроектированные изначально три уровня металлоконструкций были сокращены до одного, среднего, уровня. Металлоконструкции устанавливались исключительно на наиболее напряженных участках тоннеля, в местах примыкания к шахтным стволам круглого сечения. Было достигнуто снижение объема временных металлоконструкций на 60 %, общая экономия стальных элементов составила более 700 т (совместно с площадкой *восточный Касл Хилл*). Этот успех способствовал более плодотворному взаимодействию команд строителей и проектировщиков, которое легко можно было заметить на площадке строительства, так как преимущества подхода выходили за рамки простой экономии временных металлоконструкций. Уменьшение количества подлежащих обязательной установке стальных элементов обеспечило увеличение рабочего пространства, что позволило завершить строительство в более сжатые сроки. Более того, удалось повысить уровень безопасности работ, так как необходимость перемещения тяжелых секций в стесненных условиях была значительно снижена.

Западный Касл Хилл. Успешное применение метода наблюдений на площадке *восточный Касл Хилл* и *Шугарлоуф Хилл* позволило оценить перспективу его использования на площадке *западный Касл Хилл*. Несмотря на то, что изначально было принято решение применить метод строительства «сверху вниз», количество временных элементов раскрепления для применения на данном объекте было достаточно значительным. Проектирование и установка этих элементов осложнялись многопрофильностью геометрии тоннеля и длиной прогонов (рис. 4).

Предрасположенность к оползню увеличила степень неопределенности прочностных характеристик и нагрузки на грунт. Низкий коэффициент безопасности при расчете оползня потребовал тщательного контроля за перемещением грунта. Оползневый потенциал заключался в наличии верхнего массива, находящегося в активном состоянии, и пассивной нижней зоны (рис. 5 и 6).

Обычные критерии проектирования для боковых нагрузок на стенки котлованов не предусматривают подобных ситуаций. Расчетная нагрузка, вызывающая потерю устой-

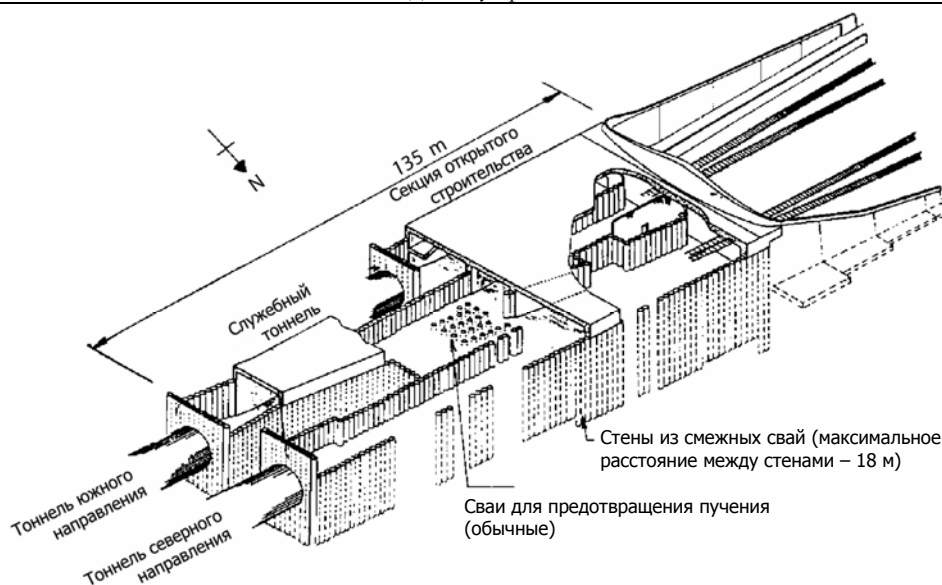


Рис. 4. Открытый способ строительства на площадке западный Касл Хилл

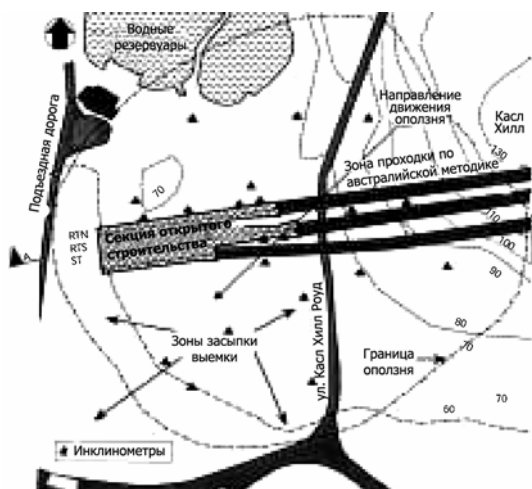


Рис. 5. План строительства на площадке западный Касл Хилл

чивости (200 кН/м^2), более чем в два раза превысила величину, полученную путем применения традиционных огибающих поверхностей Терцаги–Пека при глубине котлована 15 м. Более того, в предыдущих случаях применения метода наблюдений основным фактором явилось использование кратковременной прочности грунта за счет высоких темпов строительства. Хотя это преимущество

сохранялось и при наличии оползневых условий, пространственные эффекты требовали особого дополнительного внимания.

Выемка грунта сначала велась короткими захватками (5 м) в наименее напряженных участках с западного конца открытой выработки. Сначала использовался один ряд временного раскрепления металлоконструкциями в среднем уровне, как на площадке Шугарлоуф Хилл. Удовлетворительные результаты наблюдений позволили увеличить длину захваток до 10 м. Затем начались работы в восточной части, в непосредственном примыкании к порталам с буровыми тоннелями. Эта зона находилась в районе распространения самого высокого бокового давления оползня. Тем не менее, по-прежнему использовался только один уровень временного раскрепления. При наличии на каждом конце площадки плиты под конец строительства стало возможным устройство обширной центральной части вообще без временных распорок металлоконструкциями. Запроектированный на стадии предварительного дизайна объем временных металлоконструкций 2250 т удалось в результате снизить до 280 т, тем самым общая экономия стальных элементов на площадке строительства составила 2700 т.

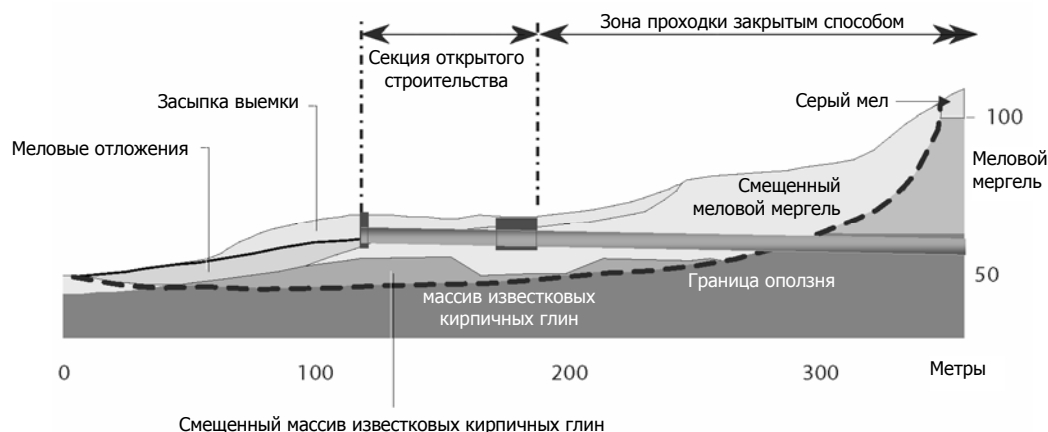


Рис. 6. Площадка западный Касл Хилл (сечение А–А)

МЭНШЕН-ХАУС

Продление линии легкого метрополитена «Доклэндс» (DLR) от станции «Лондон Тауэр Хилл» до станции «Банк» было связано с необходимостью проведения тоннелепрокладочных работ под зданием Мэншен-Хаус. Это импозантное кирпичное здание (рис. 7) – официальная резиденция Лорда Мэра Лондона – является частью архитектурного наследия страны. Здание было построено по проекту Джорджа Данса Старшего в период 1735–1753 гг. Позднее оно подвергалось значительным изменениям, включая конструктивные перестройки. Большая часть работ была связана с фундаментами здания или влияла на них тем или иным образом. Прокладка центральной линии метрополитена, которая началась в 1901 г., привела к существенному усилению фундаментов в северной части здания. В настоящий момент здание имеет размеры в плане 30×60 м, насчитывает 5 этажей, включая сводчатый подвал с кирпичными арками под двумя третями здания в северной его части.

Первая фаза строительства линии «Доклэндс» включала прокладку тоннеля-перехода небольшого диаметра прямо под зданием (рис. 8–10). До начала тоннелепрокладочных работ в зоне влияния на Мэншен-Хаус проект продления линии «Доклэндс» должен был одобрить главный инженер города. В середине 1989 г., когда проявилась тенденция превышения роста осадок от первого тоннеля по сравнению с долгосрочным прогнозом, воз-



Рис. 7. Мэншен Хаус (северный и западный фасады)

никла опасность нанесения зданию недопустимого ущерба. Дальнейшие тоннелепрокладочные работы в зоне влияния были приостановлены вплоть до детальной оценки их влияния на здание. Было рассмотрено множество альтернативных методов защиты здания при возобновлении работ, которые можно разделить по категориям:

- защита фундаментов здания от мульды оседания, возникшей при прокладке тоннеля, путем устройства защитной стены;

- локальное усиление фундаментов, например пересадка конструкций фундамента на сваи усиления и укрепление грунта;

- усиление здания, например установка конструкционных тяжелей;

- снятие эффекта осадок на здание путем компенсационного инъецирования;

- полное усиление фундаментов здания одновременно с использованием глобальной системы домкратов для компенсации появившихся осадок.

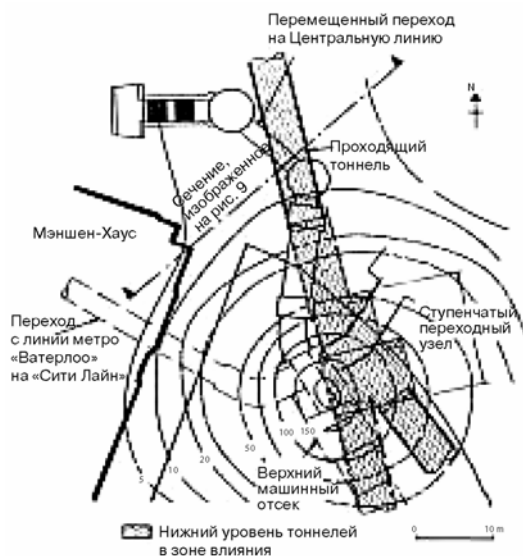


Рис. 8. Изолинии расчетных кратковременных осадок (в мм), вызванных проходящим тоннелем и сооружением ступенчатого переходного узла

Все превентивные меры приводили к возникновению новых рисков повреждения конструкций здания, значительных расходов и увеличению сроков работ. По требованию владельцев строящейся линии (DLR) была сформирована экспертная группа для проведения независимой оценки. Эта группа отчи-

тывалась перед директором проекта от DLR, главным архитектором и его консультантами. Основной задачей группы был поиск решения, связанного с минимальным риском для здания и предотвращением нанесения неприемлемого ущерба. По результатам экспертизы было принято решение о применении метода наблюдений с последовательными изменениями.

Реализация метода. Метод наблюдений стал основным инструментом минимизации риска повреждения конструкций здания Мэншен-Хаус. С его помощью были определены меры, позволяющие снизить риск до приемлемого уровня. Подход должен был получить одобрение всех сторон и максимально минимизировать уровень риска повреждений здания, который можно было демонстрировать и контролировать. Метод последовательных модификаций был принят там, где для контроля уровня риска в проект могли быть внесены изменения. Строительство линии «Доклэндс» продолжилось, и, по терминологии Пека, ситуация стала типичным примером применения подхода «лучшее решение проблемы».

Однако нужно было принять во внимание не только кратковременный эффект, но и долгосрочные последствия, для чего требовалась всесторонняя проверка безопасности.

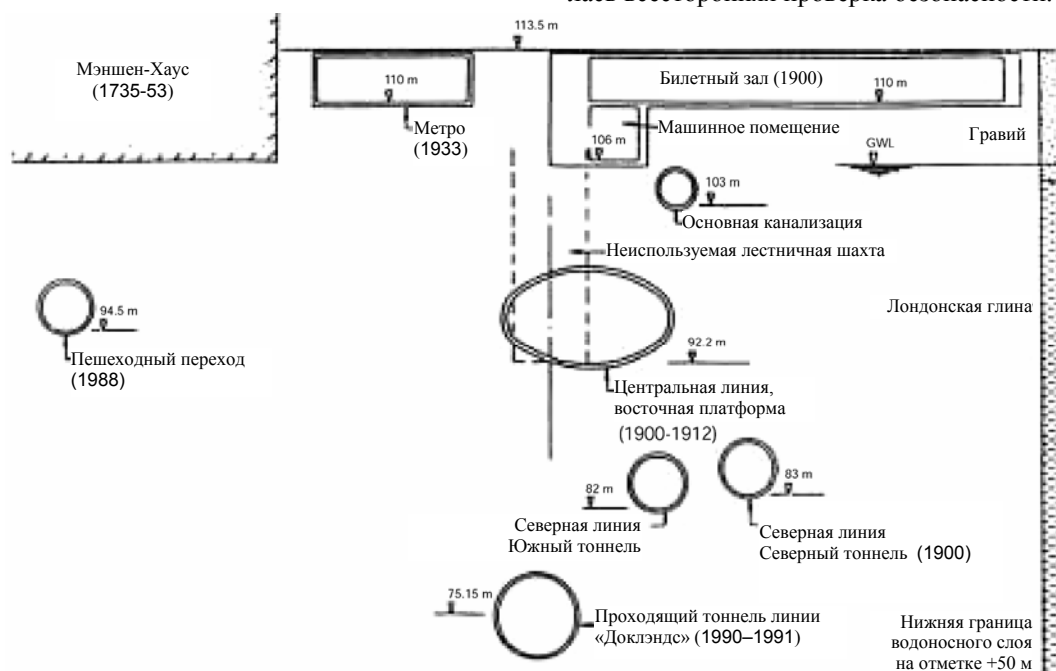


Рис. 9. Тоннелепрокладочные работы под Мэншен-Хаус (в скобках указаны даты строительства)

Прибегли к методу наблюдений. Была выполнена оценка состояния здания и его фундаментов (включая детальное обследование конструкций и всестороннюю проверку исторических записей); проведены всесторонние консультации с генеральным подрядчиком по поводу методов прокладки тоннеля и их осуществления. Особое внимание уделялось последовательности прокладки тоннелей и рискам, сопряженным с каждой из оставшихся трех фаз строительства. Перенос тоннеля-перехода был возможен только в центральную линию. Тоннель был перемещен, оставили только ступенчатый переходный узел внутри зоны влияния в рамках зоны контрактных работ.

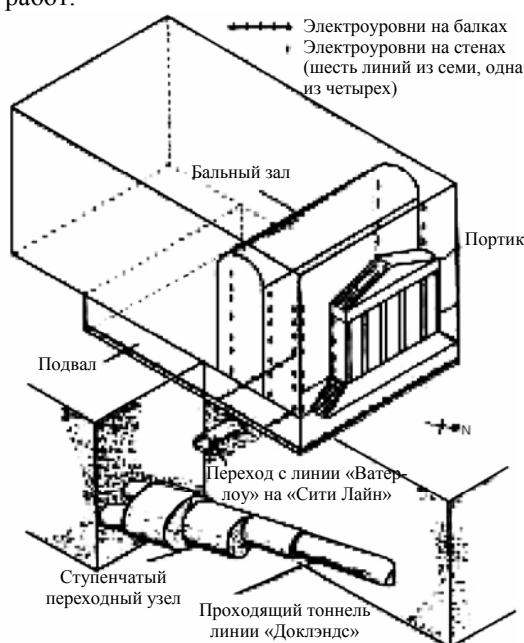


Рис. 10. Мэншен-Хаус: новые тоннели в зоне влияния и электроуровни на конструкциях здания

Можно было относительно легко определить наиболее вероятные условия выполнения тоннельных работ. Гораздо более сложной оказалась оценка условий для здания Мэншен-Хаус и его фундаментов. Эта оценка проводилась на основе исторических сведений и современного состояния. К наиболее вероятным отклонениям от благоприятных условий относятся большие объемы потерь грунта при прокладке тоннелей и чрезмерная чувствительность здания к осадкам. В частности, такие отклонения указывают на развитие

плоскостей неустойчивости в каменной кладке и реакцию здания на осадки, проявляясь скорее в деформациях изгиба, нежели сдвига [10].

Прогнозирование осадок поверхности основывалось на начальных условиях [11]. Результаты оценки поведения здания при указанных, наиболее вероятных, условиях показали приемлемо низкий уровень риска возникновения повреждений. Наиболее вероятная ожидаемая реакция – вращение свободного тела. По оценке, возможная реакция на перемещения, включая возникновение или развитие трещин, должна была заключаться в сдвиговых деформациях (в соответствии с критериями, данными Боскардиным и Кордингом [10]).

В первую очередь требовалось провести мониторинг и детально задокументировать деформации здания. В основном в этих целях использовалась тщательно выверенная система горизонтальных и вертикальных точно нивелированных электроуровней. Диапазон электроуровней составлял $\pm 3^\circ$ при разрешении в одну арк-с. Они работали с повторяемостью 2,5 арк-с, что позволяло системе регистрировать изменения уклона с точностью порядка 1 к 80000.

В целом, на здании был закреплен 101 электроуровень, из них 55 – в подвале на четырех горизонтальных стропках. Каждый из уровней, закрепленных на балках, фиксировал изменения уклона между прилегающими марками, установленными с шагом 3 м. Остальные 46 электроуровней были расставлены по вертикальным линиям на внешних сторонах семи основных кирпичных колонн в северной части здания. Приповерхностное измерительное оборудование также включало горизонтальные и вертикальные цепи электроуровней, установленных в трубке инклинометров. Эти датчики регистрировали подвижки грунта и давали полезную корреляцию с любым воздействием на здание, вызванным работами по устройству тоннеля. Вторичное измерительное оборудование состояло из системы ватерпасов и пространственной съемки. Детальную информацию об измерительном оборудовании, его работе и интерпретации показаний можно найти у Форбеса, Бассета и Латама [12], Прайса, Лонгворта и Салливана [13].

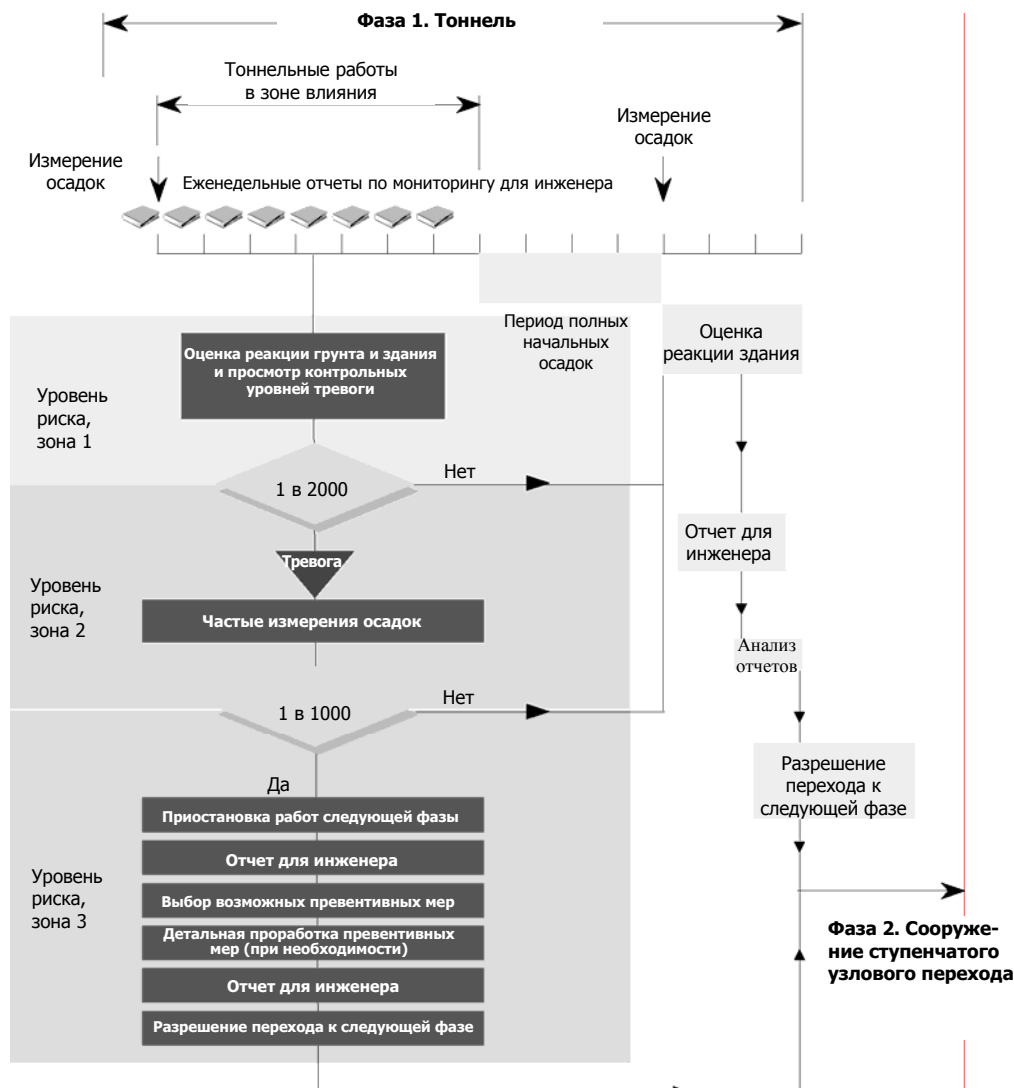


Рис. 11. Схема уровней рисков и ответных действий

В расчетах для наиболее неблагоприятных ситуаций получены более высокие потери объема грунта при прокладке тоннелей и, следовательно, более значительные осадки. В целом, совместная работа конструкций и основания была чрезвычайно сложной. Поэтому применение мощных аналитических технологий для моделирования работы грунтов основания и здания (особенно для принятия защитных мер) сочли неприемлемым, поскольку для достоверного предсказания поведения здания было слишком много важных неизвестных. Соответствующий комментарий в этой связи представлен Бурландом и

др. [6]. Были основания полагать, что подход последовательных изменений в тоннелепрокладочных работах в зоне влияния может создать кумулятивный эффект. Была поставлена задача удерживать приемлемый уровень риска на каждой стадии строительства. На рис. 11 схематично изображены все риски и возможные реакции конструкций здания на проведение работ. Тоннель, работы в котором были сопряжены с наименьшим риском, сооружался первым.

Были установлены пограничные уровни для принятия специальных мер при возникновении непредвиденных обстоятельств. Два из

этих уровней относились к границам, обозначающим ничтожно малый и маловероятный риск разрушения здания. Эти границы были установлены через угловые искажения и горизонтальную деформацию растяжения (рис. 12). Деформация растяжения была важна, так как теоретически здание должно было получить искривляющие деформации на границе мульды оседания. С учетом обоих эффектов было принято верное решение вести мониторинг угловых искажений. Таким образом были установлены три зоны риска с уровнями срабатывания для угловых искажений 1:2 000 и 1:1 000. Эти уровни стали критериями, по которым можно было оценивать результаты мониторинга и оценки риска (см. рис. 11).

Схема на рис. 11 была сфокусирована на реакции здания на проведение тоннелепрокладочных и сопутствующих работ с целью удержания приемлемого уровня безопасности. Первая зона, до первого уровня срабатывания 1:2 000, означает, что тоннелепрокладочные работы могут продолжаться, как было запланировано. Вторая зона, между уровнями срабатывания 1:2 000 и 1:1 000, предполагает более частые отчеты и обследования состояния конструкций здания. При удовлетворительных результатах обследования могла начаться следующая фаза строительства. Третья зона, ниже уровня срабатывания 1:1 000, обозначает необходимость приостановки

следующей фазы работ, проведения всесторонней оценки влияния работ на окружающую застройку и возможного принятия превентивных мер. Эти меры включают различные виды усиления фундаментов и грунтов основания, в том числе компенсационное инъецирование грунтов основания или конструкций здания, а также конструктивное усиление.

Была рассмотрена возможность экстренного усиления в виде устройства стальных тяжей. Такое усиление проводилось в южной части здания в викторианскую эпоху. При необходимости принятия превентивных мер для мониторинга их осуществления могли использоваться измерительные приборы.

Результаты. Прокладка тоннеля была завершена в предложенной последовательности. Измеренные осадки не превысили предсказанных величин. Здание получило небольшие деформации, угловые деформации не превысили 1:7000. Максимальные зафиксированные осадки в северо-западном углу здания на февраль 1991 г. составили 20 мм, из них меньше половины было связано с краткосрочным влиянием тоннелепрокладочных работ. Значительная доля осадок была обусловлена вращением свободного тела, как и предсказывалось. Не было никаких свидетельств того, что оставшиеся три фазы строительства нанесли зданию какой-либо ущерб. Проверки включали обследование состояния здания, в

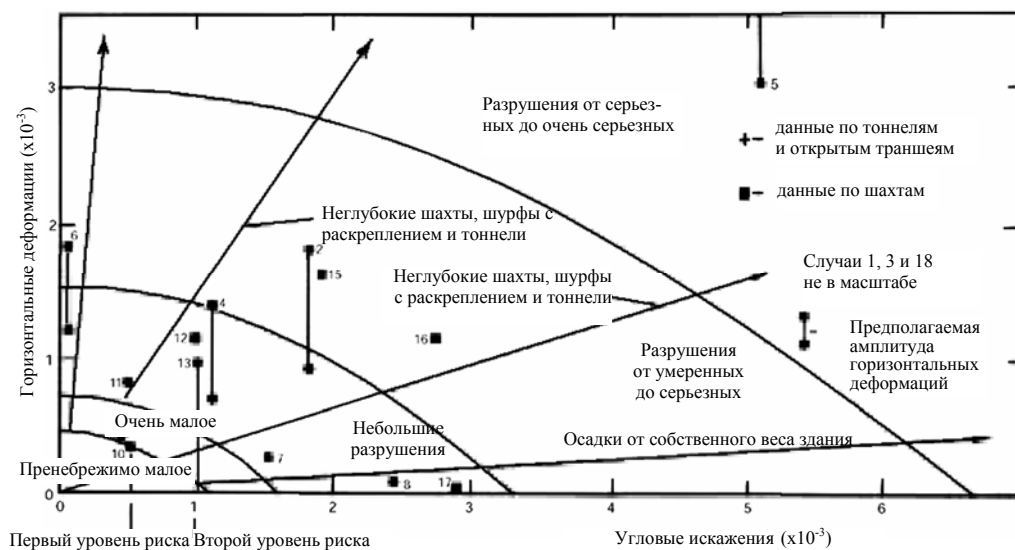


Рис. 12. Связь разрушений с угловыми деформациями и горизонтальными растяжениями

том числе методом аналитической фотограмметрии. Этот метод использовался для выявления любого влияния на цилиндрический свод, образующий потолок бального зала. Он расположен в северной оконечности здания и, как предполагалось, очень чувствителен к неравномерным осадкам. Аналитическая фотограмметрия не выявила ни малейшего увеличения существующих трещин.

Система электроуровней сработала особенно хорошо. Она отличалась максимальной чувствительностью, была устойчивой и надежной. Высокая степень точности оказалась особенно важной при определении кратковременной реакции здания на проведение тоннелепрокладочных работ отдельно от фоновых эффектов, что было необходимо при оценке сопутствующих рисков для здания. Общая тенденция развития осадок была обусловлена осадками свободного тела здания Мэншен-Хаус и не представляла угрозы для конструкций или материалов здания.

Применение метода наблюдений путем последовательных изменений показало, что риск разрушения не превышал допустимого уровня и безопасность здания была гарантирована. Кроме того, удалось избежать значительных расходов и задержек, связанных с выполнением мероприятий по защите фундаментов. По смете стоимость устройства защитной стенки составляла 3 млн фунтов стерлингов (4,9 млн долларов США), а стоимость полных работ по усилению фундаментов – 13 млн фунтов стерлингов (21,3 млн долларов США) [14].

ЛАЙМХАУС ЛИНК

Лаймхаус Линк – достаточно крупный проект по сооружению магистрального тоннеля в районе лондонских доков. В этом проекте метод наблюдений применялся в основном для определения возможности уменьшения количества стальных элементов усиления, запроектированных для временного раскрепления стен в грунте [15]. Метод наблюдений использовался здесь в сочетании с другим мощным инструментом модификации проекта – экономическим инжинирингом.

Проект, общая стоимость которого составляла 250 млн фунтов стерлингов (410 млн

долларов США), включал постройку подземного объекта на площадке, расположенной в зоне плотной городской застройки, с ограничениями физического, экологического и планировочного характера. Работы на площадке начались в ноябре 1989 г., но вскоре возникли проблемы, вследствие которых увеличились сроки строительства и стоимость проекта. В результате переговоров о необходимых изменениях между застройщиком и генеральным подрядчиком к основному договору подряда в марте 1991 г. был добавлен пункт о применении экономического инжиниринга [16, 17]. Его определяют как «творческий, организованный подход, целью которого является оптимизация стоимости и/или функционирования системы или проекта». Таким образом, синергетика экономического инжиниринга и метода наблюдений очевидна [18].

Включение в договор подряда пункта об экономическом инжиниринге облегчило возможность применения метода наблюдений, создав потенциал для модификации проекта. Поэтому возник шанс увеличить темпы строительства и получить значительную экономию средств. Также удалось повысить стандарты безопасности работ на площадке. Для этого требовалось применение подхода «лучшее решение проблемы». Тем не менее, несмотря на значительные объемы, технология раскрепления не представляла ничего уникального. Общий тоннаж металла отражал масштаб и степень сложности проекта.

История случаев строительства в подобных условиях была недостаточной для достижения должной уверенности в возможности начала работ на площадке по проекту, основанному на наиболее вероятных условиях (без использования раскрепления в среднем уровне стен). Применение метода последовательных модификаций напоминало подход, разработанный на открытых площадках строительства тоннеля под Ла-Маншем, и в большой степени основывалось на успешных результатах, достигнутых там. На *Лаймхаус Линк* применялись аналогичные концептуальные допущения, в особенности те, которые касались возможных аварийных сценариев, включая шанс развития хрупкости.

Инженерно-геологические условия проекта отличались сложностью и неоднородностью при относительно высоком природном уровне грунтовых вод и наличии крупных препятствий. Поверхностные отложения представлены насыпным грунтом и аллювием, под которыми залегает речной гравий, подстилаемый лондонскими глинами, вулвичскими и рэдингскими русловыми отложениями, тэнетскими песками. Приповерхностные отложения чрезвычайно неоднородны, но все без исключения характеризуются относительной неустойчивостью. Речной гравий – средней плотности или плотный, средней крупности, с включениями песка. Лондонские глины – переуплотненные и высокопластичные, с глубиной переходящие в средне- и тугопластичные. Вулвичские и рэдингские русловые отложения имеют переменные характеристики. Они состоят преимущественно из переуплотненных пылеватых и алевроитовых глин, но содержат более водопроницаемые линзы песка. Глины варьируют от низко- до высокопластичных и включают также более прочные отложения и песчаниковые валуны. Уровень грунтовых вод находится на глубине пример-

но 5 м от дневной поверхности в приповерхностных отложениях. С увеличением глубины пьезометрическое давление меняется за счет неполного дренажа в меловые слои, залегающие под тэнетскими песками. Это заметно прежде всего в более водонасыщенных вулвичских и рэдингских русловых отложениях. Относительное положение конструкций тоннеля и слоев типичного геологического разреза площадки показано на рис. 13.

Положение осложнялось наличием многочисленных препятствий, включая монолитный бетон, железобетон и деревянные сваи. Более подробно об инженерно-геологических условиях данной площадки можно прочитать в работе Стивенсона и Дэ Мора [19].

Метод наблюдений также применялся для проверки возможности исключения из проекта временного раскрепления по среднему уровню стен ограждения котлована, выполненного из стального шпунта в бассейне Лаймхаус. Удалось добиться только частичного успеха, так как требования к уровню мониторинга и степень риска при условии полноценного применения метода наблюдений были сочтены чрезмерными. В данном проекте метод

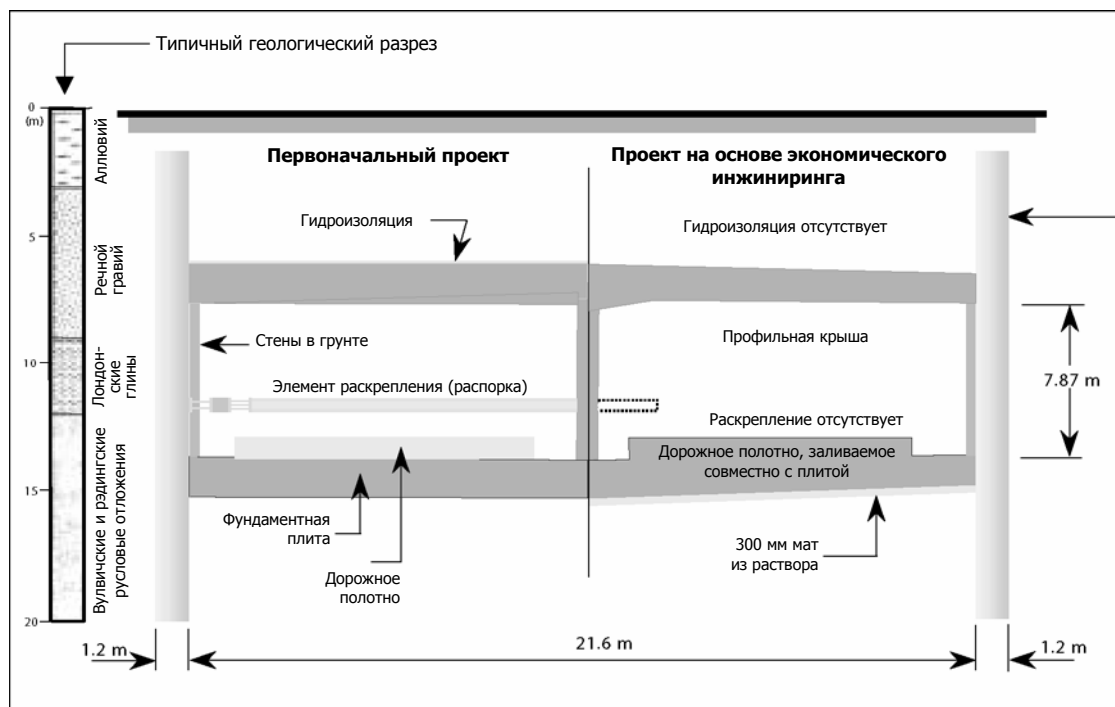


Рис. 13. Поперечное сечение площадки строительства Лаймхаус Линк (прокладка тоннеля открытым способом)

последовательных модификаций был распространен за пределы своей максимальной практической оправданности, хотя с его помощью и удалось улучшить последовательность строительных операций и уменьшить уровень заглубления стального шпунта более чем на 80%. Это позволило достичь экономии времени и средств, а также значительно повысить экологичность проекта [15].

Применение метода наблюдений базировалось на тщательно контролируемой последовательности операций, призванных наглядно демонстрировать и постоянно поддерживать должный уровень безопасности производства работ на всех этапах строительства. Изначальная аналитическая модель показала возможность снятия временного раскрепления по среднему уровню шпунта. Следующим шагом явилось полномасштабное испытание, доказавшее, что массивные опоры из стальных труб диаметром 1200 мм и весом до 30 т, а также связанная с ними система выемки грунта, могли быть исключены из проекта без какого-либо ущерба (рис. 14). Это привело к материальной экономии средств, позволило увеличить скорость, гибкость и безопасность работ. Появилась возможность использования более тяжелой техники при выемке грунта, что невозможно при наличии системы раскрепления. Это, в свою очередь, сделало процесс производства работ более экономичным и быстрым. Система раскрепления из массивных опор также явилась бы препятствием для вязки арматуры и бетонирования. Уровень безопасности многократно повысился, так как отпала необходимость устанавливать, разбирать, перемещать и вновь собирать тяжелую систему раскрепления в ограниченном пространстве под плитой крыши тоннеля. Объем работ увеличился до 9 фронтов экскавации по всему протяжению тоннеля – 1,7 км, включая два фронта экскавации в бассейне Лаймхаус.

Благодаря обратной связи метода наблюдений была оптимизирована модель взаимодействия конструкции и основания, что позволило внести полезные изменения в процесс производства работ. Изначально предусматривалось проводить откопку секциями по 3...4 м в день с применением мата из раствора толщиной 300 мм, заливавшегося во второй половине дня ближе к вечеру. Эта плита игра-



Рис. 14. Испытание системы раскрепления на Роупмэйкэрс Филд

ла роль дополнительного элемента безопасности, усиливая трехмерный эффект образования арочного свода в грунте. Без системы раскрепления выемка грунта проходила быстрее, увеличилась дневная норма выработки. Результаты работ на секции, выполненной в последнюю очередь, сравнивались с результатами работ на предыдущих секциях и, если они признавались удовлетворительными, модификация получала практическое применение. Мат из раствора анализировался аналогичным образом, что привело к уменьшению его толщины до стандартных 100 мм, при этом снизились объем выемки грунта и количество расходуемого бетона.

Существенный успех применения метода наблюдений на площадке Лаймхаус Линк позволил достичь экономии материала приблизительно в 5 000 т. Это соответствовало экономии 5 400 пог. м материалов временного раскрепления и 2 700 пог. м материалов распределительного пояса. Вместо ожидавшейся задержки темпа производства работ проект удалось завершить на 5,5 месяцев раньше установленного срока.

СТЕНА В ГРУНТЕ В ХИТРОУ

Железнодорожная линия «Хитроу Экспресс» должна была значительно улучшить сообщение между аэропортом в Хитроу и

центральным Лондоном: время поездки от аэропорта до вокзала Паддингтон не должно было превышать 15 мин (рис. 15). «Хитроу Экспресс» – это частный проект, принадлежащий компании ВАА. Линия была полностью готова к эксплуатации к середине 1998 г., в январе 1998 г. было начато частичное движение поездов к окраинам аэропорта.

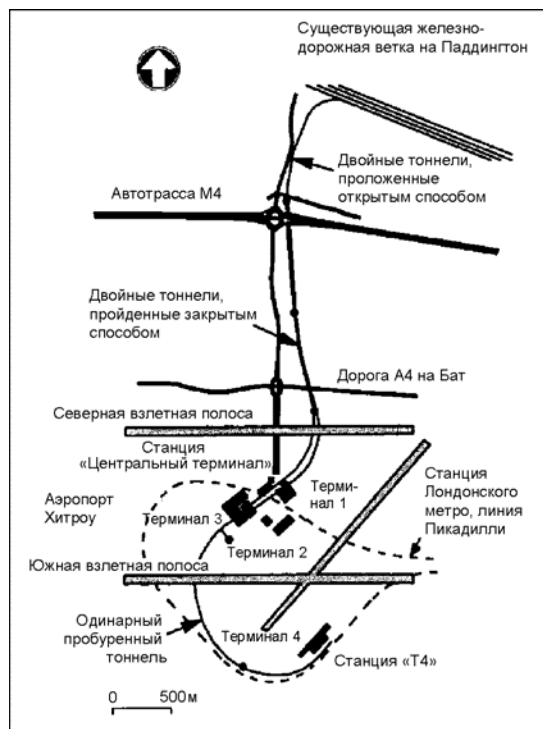


Рис. 15. Карта маршрута Хитроу Экспресс

Обрушение тоннелей на станции «Центральный терминал» произошло во время строительства 21 октября 1994 г. К счастью, никто не пострадал, но был причинен существенный материальный ущерб, в том числе и некоторым примыкающим конструкциям. Потенциальная задержка на данном этапе оценивалась в 18 месяцев. Важным моментом восстановительной стратегии было создание специальной команды, состоявшей из основных акционеров проекта.

Задачей данной команды было обоснование решений о восстановительных работах с учетом всех тоннельных работ, особенно требующих применения распыляемой набетонки. Особое внимание уделялось станции «Центральный терминал», где произошло обрушение. Ключевым элементом восстановления станции стало устройство круглой в плане стены в грунте (рис. 16, 17). Проект должен был учитывать наличие сильно расструктуренного грунта; пустот, заполненных водой; значительных пространственных и экологических ограничений. Работы затруднялись наличием большого количества монолитного бетона, железобетона, а также строительного оборудования, засыпанного при обрушении тоннеля в 1994 г. Четкая стратегия управления риском была разработана для учета наиболее вероятных из худших грунтовых условий, в том числе разрабатывались соответствующие планы на случай непредвиденных затруднений.

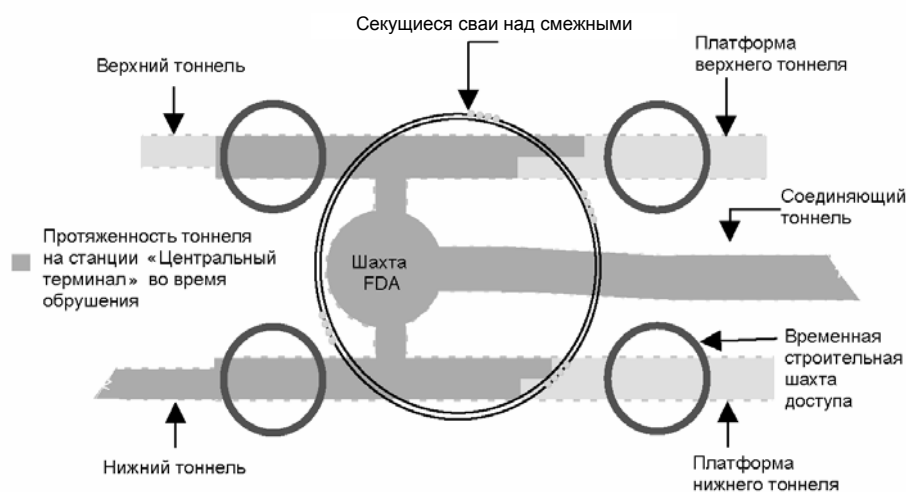


Рис. 16. Вариант устройства круглой в плане стены в грунте



Рис. 17. Возведение стены в грунте в апреле 1996 г. (на заднем плане – паркинг 1А)

После тщательного зондирования и применения мер по стабилизации грунтового массива были установлены 182 секущиеся сваи, которые сформировали внешний круг. Эти большие буронабивные сваи имели длину 40 м и уменьшались в диаметре на глубине 20 м, чтобы продолжиться как индивидуальные «смежные» сваи. Перманентное боковое раскрепление осуществлялось с помощью железобетонных колец, отлитых по сваям в соответствии с очередностью работ по откопке.

Были проведены тщательный мониторинг

грунтов и конструкций при помощи различной измерительной аппаратуры, в том числе электроуровней, пьезометров, тензодатчиков, а также пространственное обследование. В июле 1996 г. было установлено 255 буронабивных свай для устройства плиты основания, строительство плиты было завершено к сентябрю 1996 г.

Основой проектирования и строительной стратегии стало применение метода наблюдений через проведение последовательных изменений по его результатам.

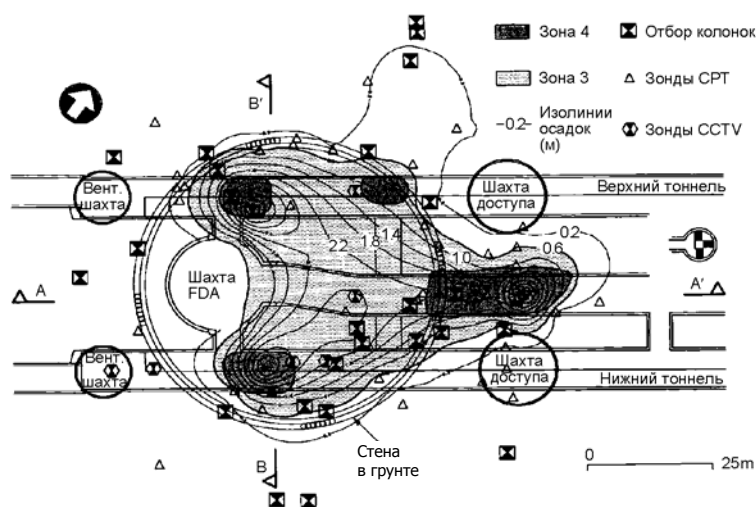


Рис. 18. Изолинии осадок лондонской глины с предполагаемыми местами разрушений

Грунтовые условия данной местности до обрушения тоннеля характеризовались относительной однородностью, с примерно 6-метровой толщей террасного гравия, под которым находится слой лондонской глины мощностью примерно 60 м. Под лондонской глиной находятся вулвичские и редингские отложения, а под ними – слой мела (с глубины примерно 90 м от дневной поверхности) [20].

Данные, полученные по различным пробным скважинам, указывали на уровень верхнего слоя лондонской глины. Результаты были геостатически интерполированы, чтобы точнее предсказать контуры поверхности слоя лондонской глины до и после обрушения. Разница между двумя интерполированными поверхностями была представлена в виде изолиний осадок, произошедших в результате обрушения (рис. 18). Результаты исследований и данные по осадкам указывают на 4 зоны с сильно разрушенным грунтом (зона 4 на рис. 18). С учетом относительно большого объема обрушения (примерно 6000 м³) и соответствующего размера работ по откопке сочли вероятным, что значимый, зависящий от времени, процесс разупрочнения глины должен был начаться в результате обрушения, с последующим уменьшением напряжений, сопровождающим устройство стены в грунте.

На основе инженерно-геологических изы-

сканий на площадке и численного прогноза в массиве лондонских глин были обозначены 4 зоны (см. рис. 18). Зона 1 соответствовала глинам ненарушенной структуры, не подвергшимся механическому воздействию; каждая из остальных зон (2–4) характеризовалась двумя группами свойств (см. таблицу). Первая группа содержала умеренно приемлемые параметры, представляющие влияние этой зоны на работу стены в грунте в целом. Вспомогательная группа параметров составлялась «самыми неблагоприятными» величинами, представляющими локальные воздействия, которые могли активизироваться в местах, где участки наиболее сильно расструктуренного грунта в данной зоне могли генерировать отрицательные нагрузки на кольцо кессона.

Стена в грунте. Рассматривалось несколько традиционных вариантов, однако к декабрю 1994 г. была окончательно выбрана круглая в плане стена в грунте. При диаметре 60 м и глубине 30 м этот вариант представлялся самым простым решением проблемы. Известны случаи разработки и более крупных котлованов, но ни один из них не приходилось устраивать в столь неоднородных и нестабильных грунтовых условиях с применением стены из буронабивных свай (рис. 19). Круглая в плане стена в грунте имела ряд преимуществ:

Параметры лондонских глин

Параметры	Уровень	Зона 2		Зона 3		Зона 4	
		MC	WC	MC	WC	MC	WC
с _u , кПа	118...108 mTD	50+7 d	30+7 d	30+7 d	0+7 d	0+7 d	10+1,5 d (= 0,25σ' _v)
	108...93 mTD	105+3,5 d	85+3,5 d	85+3,5 d	55+3,5 d	55+3,5 d	
γ _B , кН		19,5	19,5	19,5	19	19	16
φ', град		25	25	25	25	25	21
с', кПа		10	5	5	0	0	0
Деформация, %		<0,1	0,2	0,2	0,5	1	N/A
Eu/cu		700	500	500	350	150	150
kh, м/с		1×10 ⁻⁸ to 1×10 ⁻¹⁰		1×10 ⁻⁷ to 1×10 ⁻⁹		1×10 ⁻³ to 1×10 ⁻⁷	
kv, м/с		kh×10 ⁻¹		kh×10 ⁻¹		kh×1	
K ₀ (I)		1,0	0,8	0,8	0,6	0,6	0,6

Примечания: d – глубина от дневной поверхности; MC – умеренно приемлемые параметры; WC – самые неблагоприятные параметры; зона 4 распространяется до отметки +93 TD (темзенский репер); в зоне 2 следует использовать параметры MC.

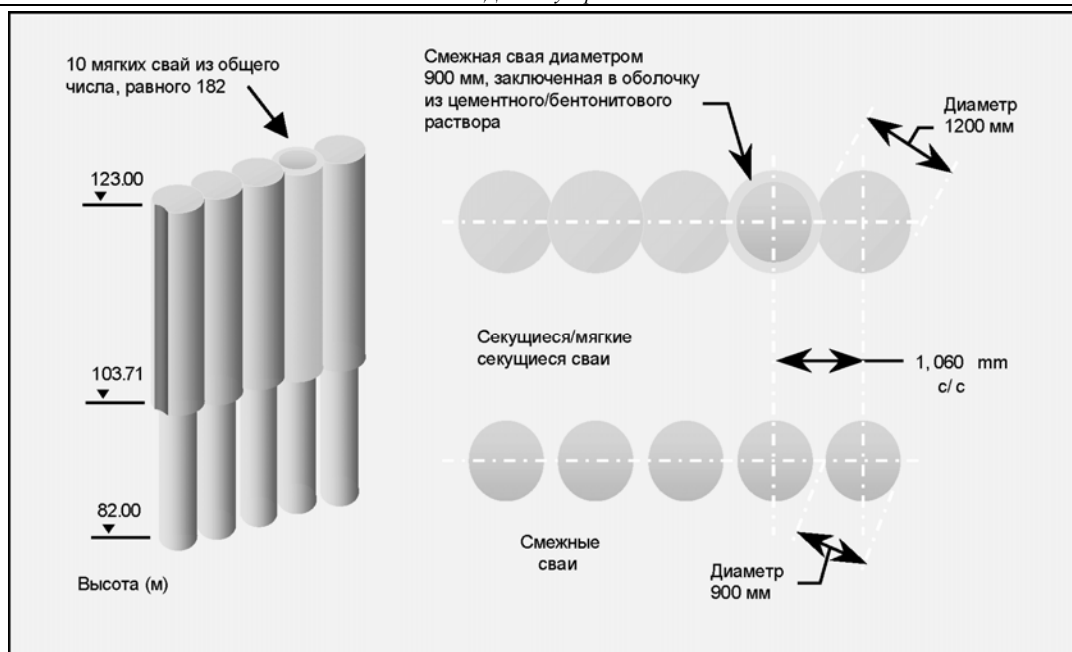


Рис. 19. Секущиеся и смежные сваи

полное отсутствие системы поперечного раскрепления создавало максимум пространства для ведения работ;

за счет охвата большего объема расструктуренного грунта (включая большинство зон с максимальными осадками) снижался общий объем выемки грунта. Благодаря устройству постоянных вентиляционных шахт в южной оконечности площадки в непосредственной близости от стены в грунте, а не по прямоугольному периметру удалось снизить объем окончательной откопки на 20000 м³. Это явилось серьезным экологическим и практическим преимуществом, так как ведение строительных работ на территории огромного действующего аэропорта могло негативно сказаться на работе последнего;

симметрия, предлагаемая данным решением, позволяла применить единообразную последовательность ведения работ по откопке котлована и заливке внутренних железобетонных колец набетонки, поддерживающих сваи (рис. 20). Такой ритм работ упростил ведение мониторинга перемещения грунта и конструкций, так что любые, в особенности нежелательные, тенденции можно было отслеживать на ранней стадии.

Последний аспект хорошо сочетался с применением метода наблюдений, который

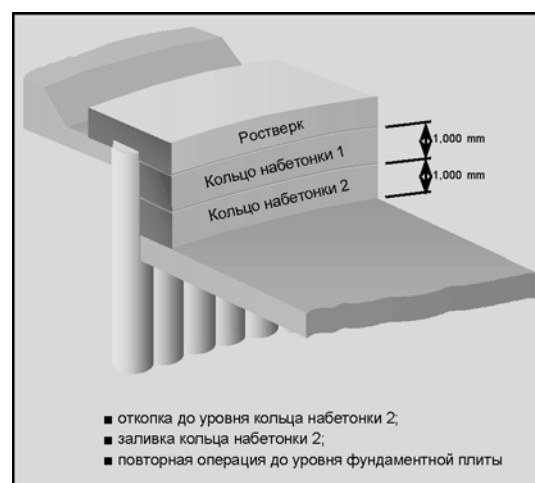


Рис. 20. Последовательность устройства железобетонных колец

являлся частью общей стратегии управления рисками при сооружении котлована и играл ключевую роль в достижении дополнительной экономии времени и средств. В отличие от трех вышеописанных случаев строительства, метод наблюдений здесь рассматривался не фрагментарно или ограниченно, а в качестве важного инструмента проектирования и сооружения стены в грунте.

Чрезвычайно привлекательной была возможность с самого начала создать проект, который можно было бы изменять в ходе строительства и легко отслеживать.

Применение метода наблюдений. Метод применялся через введение последовательных изменений. Ситуация требовала создания особенно надежного проектного решения, способного противостоять (при использовании адекватных, заранее разработанных чрезвычайных мер) самым неблагоприятным грунтовым условиям.

В данном случае решались 3 задачи. Главной задачей был контроль риска, связанного с проведением работ по выемке грунта такого масштаба. Отслеживались любые подвижки грунта и стены в грунте, в особенности имеющие негативную тенденцию. Вторая задача – обеспечение чрезвычайных мер безопасности в случае необходимости. Предполагалось, что метод наблюдений позволит выявить чрезмерные меры безопасности или свести их к минимуму, тем самым уменьшив их влияние на сроки и стоимость проекта.

Третья задача – внесение в проект изменений с целью сокращения времени его реализации. Основными преимуществами введения последовательных модификаций являются возможность избежать применения чрезвычайных мер и вносить в проект постепенные улучшения.

Чрезвычайные меры. Основными критическими параметрами, которые измерялись при проведении работ, были отклонения свайной стены в процессе откопки и вызванные ими перемещения грунта. Эти два фактора связаны с гибкостью конструкции ограждения котлована, а также известным фактом, что экскавация всегда вызывает подвижки грунта. Меры безопасности заключались в применении более жестких, более сильно армированных железобетонных колец, примыкающих к стене в грунте, а также в первоначальной откопке грунта вдоль стены с целью создания запаса времени перед выемкой грунта по центру. Сооружение железобетонных колец значительно опережало бы окончательную выемку основного массива грунта, создавая защиту, уменьшающую перемещения стены.

Параметрический анализ показал, что при наихудшем сценарии максимальный изги-

бающий момент мог развиваться в смежных сваях диаметром 900 мм со смещениями более 75 мм. Этот показатель смещения определялся как предельное состояние. Целью являлось предотвращение возможности достижения этого состояния путем принятия одной из вышеперечисленных чрезвычайных мер на ранней стадии окончательной откопки. Для своевременного принятия этих мер следовало достаточно рано и, по возможности, наиболее достоверно зарегистрировать тенденции развития подвижек ограждения котлована. Работа стены в грунте находилась под постоянным наблюдением на протяжении всего процесса строительства. Детальный анализ был запланирован на уровне откопки 7 м для своевременной идентификации и оценки тенденций в работе конструкций. В случае регистрации негативных трендов планировалось применение чрезвычайных мер, но в действительности никаких неблагоприятных тенденций выявлено не было.

Основным измерительным оборудованием были инклинометры, установленные в сваях и в непосредственно прилегающем грунте, использование которых сопровождалось тщательной геодезической съемкой. Инклинометры представляли собой цепочки электроуровней, установленных на направляющих панелях. Использовались также пьезометры, экстензиометры и пространственная съемка (рис. 21).

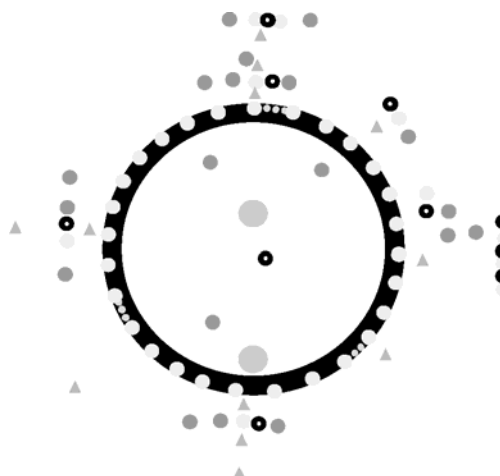


Рис. 21. Измерительная аппаратура на стене в грунте: ○ – устье скважины; ● – инклинометры; ⊙ – экстензиометры; ▲ – геологическая съемка; ● – пьезометры

Работа конструкции. Общая картина изгиба стены в грунте представлена на рис. 22. Приведенные величины – это максимум для различных стадий. Можно заметить, что работа конструкции превзошла самые оптимистичные прогнозы. В среднем максимальные отклонения свайных стен составили примерно 15 мм. Достигнутый контроль бокового перемещения грунта сопоставим с другими примерами глубокой экскавации в лондонских глинах [21, 22].



Рис. 22. Изгиб стены в грунте

Средние отклонения были примерно на 50% меньше предсказанных (рассчитанных до начала строительства как наиболее вероятные). Тенденция отклонений стала совершенно очевидной на глубине 7 м, что позволило внести в проект ряд полезных изменений. Первыми из них стали увеличение глубины откопки и устройство железобетонного бетонного кольца с 1 м до 1,2 м. Это изменение, ускорившее строительство, было выполнено после завершения девятого кольца, все последующие кольца были сделаны с увеличенной глубиной.

Другое значительное изменение, внесенное в проект, касалось раннего начала проходки тоннеля (рис. 23).



Рис. 23. Раннее начало проходки тоннеля

Первоначально предполагалась линейная последовательность работ до устройства фундаментной плиты, таким образом выдерживался ритм строительства и облегчался мониторинг. Однако с учетом прекрасной работы конструкций было принято решение о прокладке сквозь внешнее кольцо свай пробных тоннелей, входящих в котлован из прилегающих шахт ниже текущего уровня откопки. Затем тоннели были увеличены до запроектированного размера и временно заблокированы массой бетона для сохранения действия бетонного кольца. Таким образом, раннее начало прокладки тоннеля произошло задолго до завершения откопки внутри ограждающей конструкции. Это позволило не только ускорить строительство тоннеля, примыкающего к котловану, но и раньше начать путееукладку.

КОНТРАКТНЫЕ АСПЕКТЫ

Метод наблюдений может рассматриваться как система управления рисками. Уровень риска и вынужденные изменения всегда имеют отношение к контрактам. Следовательно, условия контракта оказывают

важное (зачастую решающее) влияние на применение метода наблюдений. При рассмотрении такой возможности в первую очередь встает вопрос о возрастающем риске. Однако грамотное применение метода приводит к увеличению безопасности, в первую очередь в ситуациях «лучшего решения». Но это не менее важно и для других случаев реализации метода наблюдений. Увеличить безопасность можно, например, за счет:

замены худшего из сценариев на менее рискованную ситуацию;

исключения трудоемких временных работ и создания более просторного рабочего пространства;

командной работы, налаженной взаимосвязи, контроля во время строительства и планирования мер на случай возникновения непредвиденных обстоятельств.

Должна существовать возможность вносить изменения в проект по ходу работ. Проект должен полностью учитывать конкретные методы строительства. Контрактные условия должны способствовать выполнению этих требований. Последние лучше всего выполняются при контрактах типа «проект–строительство». Традиционные контракты, когда на тендер выставляется полностью готовый проект, разделяют проектировщика и исполнителя проекта, препятствуя созданию проекта, отражающего реальные условия строительства. Подобное разделение может привести к конфронтации. Все перечисленное несовместимо с командной работой, необходимой для успешного применения метода наблюдений. Между командами проектировщиков и строителей должна быть хорошая взаимосвязь. Подход «лучшее решение» призван создать нужную обстановку независимо от исходных контрактных условий. Точно так же для применения подхода «*ab initio*» подходящие контрактные условия создаются до начала строительных работ. Пек указывает, что подход «лучшее решение» гораздо более известен [1].

Однако действия по проекту, основанному на наиболее вероятных условиях, могут оказаться слишком поспешными. Сопутствующий уровень риска, по мнению некоторых участников контракта, может быть слишком высоким. При отсутствии альтернативных

стратегий применение метода наблюдений может быть не одобрено. Ограничение может быть связано с контрактными условиями или беспокойством проектировщиков относительно безопасности, спровоцированным отсутствием наглядных примеров, неуверенностью в качестве представленной информации или предлагаемых параметров.

При строительстве тоннеля под Ламаншем и в примере с объектом Мэншен-Хаус возникли вопросы по основному проекту. В случае с Лаймхаус Линк возникли трудности двоякого плана. Во всех перечисленных ситуациях трудности удалось преодолеть с помощью метода наблюдений путем анализа последовательных изменений. Подход последовательных изменений по сути своей гибкий и может использоваться как в ситуациях *ab initio*, так и в ситуациях «лучшее решение».

Прочная связь между методом наблюдений и экономическим инжинирингом была продемонстрирована на примере Лаймхаус Линк. Оба направлены на экономию времени и средств, и оба требуют более тесной связи между проектом и строительством, а также соответствующих контрактных условий. Включение в договор раздела об экономическом инжиниринге может облегчить внедрение метода наблюдений. Примером совместного применения экономического инжиниринга и метода наблюдений служит устройство перемычки при строительстве Хитроу Экспресс [23–25]. Этот случай может быть рассмотрен как реальный пример ситуации *ab initio*, когда применение метода наблюдений подразумевалось с самого начала выполнения работ на площадке. Но если посмотреть на это в контексте строительства самого Хитроу Экспресс, то можно говорить о подходе «лучшее решение», который помог вернуть проект в рабочее состояние. В любом случае применение метода последовательных изменений оказало дополнительную помощь и улучшило контроль при учете разнообразных грунтовых условий и совместной работы конструкции и грунтов основания. Удалось избежать непредвиденных обстоятельств и добиться внесения в проект ряда улучшающих поправок.

Новый инженерный контракт (NEC), принятый в случае Хитроу Экспресс, упростил

внесение изменений, а создание единой команды способствовало возникновению условий для применения метода наблюдений [26]. Данная форма контракта была опубликована в 1995 г. Она способствует установлению справедливого баланса между сторонами, принимающими участие в строительном процессе, в том числе через использование неконфронтационного языка общения. Все взаимосвязанные вопросы сгруппированы, а не разбросаны по всему тексту договора.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Метод наблюдений может с успехом решать основные задачи – экономии средств и времени, а также гарантии приемлемого уровня безопасности. Однако есть и серьезные ограничения по его использованию. Общие условия конкретного проекта должны подходить для применения метода. Основные требования должны быть осознаны и тщательно выполнены [1]. Важным является определение тенденций и отделение ключевых ситуаций, вызванных строительными работами, от фоновых или вторичных эффектов. Выполнение этих жестких требований обременительно. Увеличение сроков проведения и стоимости работ должны быть соизмеримы с получаемой выгодой. Однако прямая выгода может оказаться значительной. К преимуществам метода наблюдений относятся:

- более глубокая связь между проектом и строительством;
- возросшая безопасность проведения работ во время строительства;
- лучшее понимание совместной работы грунтов основания и конструкции;
- усовершенствование использования и работы измерительной аппаратуры;
- адекватная информационная библиотека, содержащая информацию о случаях строительства в аналогичных условиях;
- более сильная мотивация и командная работа.

Хотя у данного метода есть определенные ограничения, тем не менее он может использоваться гораздо чаще, чем это происходит сегодня. Традиционные контрактные условия могут вызвать значительные трудности, создавая барьер между проектировщиком и под-

рядчиком, мешая формированию командного подхода к управлению рисками.

Подход последовательных модификаций мог бы чаще использоваться для преодоления контрактных и технических сложностей. Он позволяет осуществлять последовательное улучшение проекта с учетом реальных условий площадки. Таким образом можно добиться максимальных преимуществ без снижения уровня безопасности строительных работ.

И в заключение автор выражает благодарность д-ру Р. Б. Пеку за его неоценимую помощь и советы. Также автор благодарит профессора Дж. Хеймана и компанию «Mueser Rutledge Consulting Engineers», своих многочисленных коллег по компании Transmache Link (площадка строительства тоннеля под Ла-Маншем), Balfoar Beatty/Amec (площадка Мэншен-Хаус) и Mott MacDonald Group (все приведенные примеры строительства и мониторинга) за их содействие и поддержку. Благодарность выражается С. Сноудену, главному инженеру города, корпорации Лондона за разрешение опубликовать раздел, посвященный зданию Мэншен-Хаус, и компании ВАА за раздел о котловане в Хитроу. Мнение и взгляды по последнему разделу принадлежат только автору статьи и могут не совпадать с мнениями компании ВАА или Mott MacDonald.

ОБ АВТОРЕ

А. Дж. Паудерхэм – член Королевской инженерной академии, бакалавр естественных наук, дипломированный инженер, сотрудник Института гражданского строительства, сотрудник Института инженеров-строителей, директор по транспорту в компании «Мотт МакДональд Групп». В начале своей карьеры специализировался на проектировании и строительстве мостов. Имеет международный опыт управления крупными проектами и специализированные знания в области фундаментостроения, особенно в части строительства тоннелей, глубоких котлованов и проведения работ открытым способом. Дж. Паудерхэм является одним из ведущих специалистов в развитии метода наблюдений и экономического инжиниринга в Великобритании. Среди основных проектов, в которых автор

принимал участие: метро в городах Тайн, Вэр и Каракас, легкая железная дорога в районе лондонских доков, тоннель под Ла-Маншем, железная дорога Грейт Белт, центральная магистраль в Бостоне, продление Юбилейной линии лондонского метрополитена и Хитроу Экспресс.

Список литературы

1. Peck R. B. Advantages and Limitations of the Observational Method in Applied Soil Mechanics // *Geotechnique*. 1969. No. 2. 19.
2. Peck R. B. The Last Sixty Years // Proc. XI ICSMFE. San Francisco, Balkema, Rotterdam, 1985.
3. Powderham A. J. An Overview of the Observational Method: Development in Cut and Cover and Bored Tunnelling Projects // *Geotechnique*. 1994. No. 4. 44.
4. Peck R. B. Beware the Oddball // ASCE Met. Section, Spring Seminar, Urban Geotechnology and Rehabilitation. 1998. April 22–23.
5. Peck R. B. Where Has All the Judgement Gone? // *Can. Geotech. J.* 17, No. 4; NGI Publ. 134, 1–5, 1980.
6. Burland J. B., Broms B., & de Mello V. F. B. Behaviour of Foundations and Structures. // in. Garston, Building Research Establishment, 1978.
7. Powderham A. J., & Nicholson D. P. The Way Forward; The Observational Method in Geotechnical Engineering. // ICE, Thomas Telford, London, 1996.
8. Duggleby J. C., Avgherinos P. J., & Powderham A. J. Channel Tunnel: Foundation Engineering at the U.K. Portal. // in Proc. 4th Int. DFI Conf. Stresa, Rotterdam: Balkema, 1991.
9. Powderham A. J., & Tamaro G. The Mansion House London—Risk Assessment and Protection. // *J. Constr. Engng. Mgmt.*, ASCE, 1995.
10. Boscardin M. D., & Cording E. J. Buildings Response to Excavation-Induced Settlement. // *J. Geotech. Engng. Am. Soc. Civ. Engrs.* 115, No. 1, January, 1989.
11. Rankin W. J. Ground Movements Results From Urban Tunnelling: Predictions and Effects. // in *Engineering Geology of Underground Movement*, Bells et al., eds., Engineering Geology Special Publication No. 5. London. 1988.
12. Forbes J., Bassett R. H., & Latham M. S. Monitoring and Interpretation of Movement of the Mansion House Due to Tunnelling. // *Proc. Instn. Civ. Engrs. Geotech. Engng.* 107, April 1994.
13. Price G., Longworth T. I., & Sullivan P. J. E. Installation and Performance of Monitoring Systems at the Mansion House. // *Proc. Instn. Civ. Engrs. Geotech.*
14. Frischmann W. W., Hellings J. E. & Snowden C. Protection of the Mansion House Against Damage Caused by Ground Movements Due to the Docklands Light Railway Extension. // *Proc. Instn. Civ. Engrs. Geotech. Engng.* 107, April, 1994.
15. Glass P. R., & Powderham A. J. Application of the Observational Method at Limehouse Link. // *Geotechnique* 1994. No. 4. 44.
16. Dell'Isola A. J. Value Engineering in the Construction Industry. // third edition, New York: Van Nostrand Reinhold, 1982.
17. Institution of Civil Engineers, *Creating Value in Engineering*, ICE design and practice guide, Thomas Telford, London, 1996.
18. Powderham A. J., & Ruttly P. C. The Observational Method in Value Engineering. // *Proc. 5th. Int. Conf. Piling Deep Fdns.* Bruges, 1994.
19. Stevenson M. C., & de Moor E. K. Limehouse Link Cut-and-Cover Tunnel: Design and Performance. // *Proc. 13th Int. Conf. Soil Mech.*, New Delhi, 1994.
20. Powderham A. J., & Rankin W. J. Heathrow Collapse Recovery Solution Cofferdam—Planning, Design and Implementation. // *Proc. Intl. Conf. On Foundation Failures*, Institution of Engineers, Singapore, May, 1997.
21. Burland J. B., & Hancock R. J. R. Geotechnical Aspects of the Design for the Underground Car Park at the Palace of Westminster, London. // *Structural Engineer*, 55, No. 2, 1977.
22. Marchand S. P. A Deep Basement in Aldersgate Street, London. // *Proc. ICE*, 93, February, 1993.
23. Wheeler P. Terminal Condition. // *Ground Engineering*. Vol. 29, No. 1, 1996.
24. Wheeler P. Arrival Procedures. // *Ground Engineering*. Vol. 29, No. 7, 1996.
25. Wallis S. Heathrow Rises From the Mire and Shines. // *Tunnel, International Journal for Subsurface Constructions*. STUVA, Cologne. Vol. 6/96. 1996.
26. The New Engineering Contract, the Institution.