

Применение инновационных разработок при строительстве тоннелей в сложных градостроительных и инженерно-геологических условиях.

Докладчик: А.В. Черняков, к.т.н., президент НПО «Космос», Россия.

За время своего существования НПО «КОСМОС» накопило уникальный опыт строительства подземных сооружений, в том числе – в сложных градостроительных и инженерно-геологических условиях. В качестве примеров приведем следующие объекты:

- в Москве:

Лефортовский автотранспортный тоннель мелкого заложения, Суцевский, Ходынский, Ленинградский, Волоколамский и строящийся Алабяно–Балтийский тоннели в составе транспортной развязки в районе станции метро Сокол;

- в Московской области:

тоннель на Сколковском шоссе;

- в Санкт-Петербурге:

Муринский тоннель;

- в Перми:

автодорожные тоннели под путями Транссибирской железной дороги;

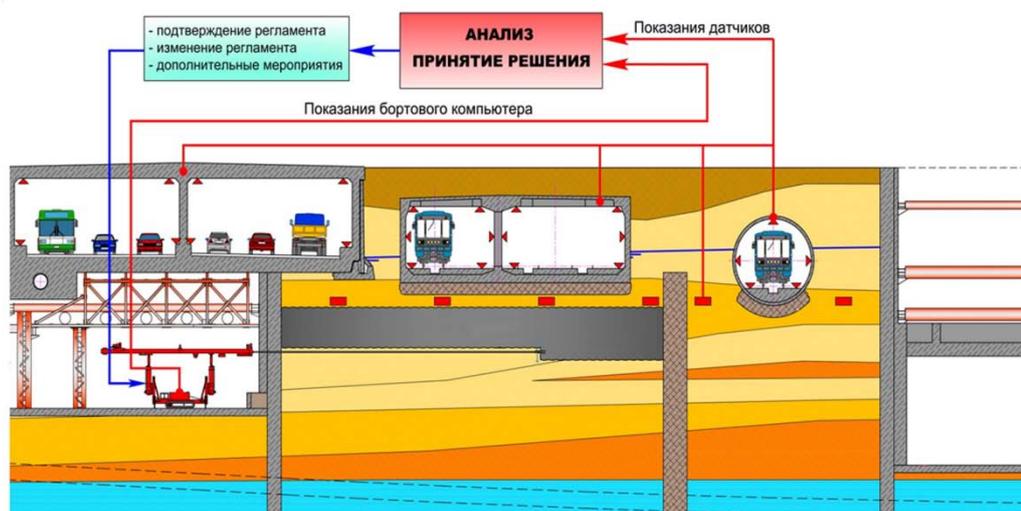
- в Казани:

станция метро Горки и автотранспортный тоннель под улицей Ершова;

- реконструкция фундаментов дворцового комплекса Царицыно в Москве;

- участие в строительстве нулевого цикла нового здания Мариинского театра в Санкт-Петербурге.

Строительство всех этих объектов производилось в условиях плотной городской застройки, в непосредственной близости от фундаментов зданий, при большой насыщенности подземного пространства инженерными коммуникациями, при наличии интенсивного движения автотранспорта в зоне строительства в слабых, часто – водонасыщенных грунтах, при глубинах вскрываемых котлованов до 30 – 40 метров. В границах участков строительство велось и ведется под действующими объектами повышенной ответственности (общие коммуникационные коллекторы, железнодорожные пути, линии метрополитена) (Рис. 1).



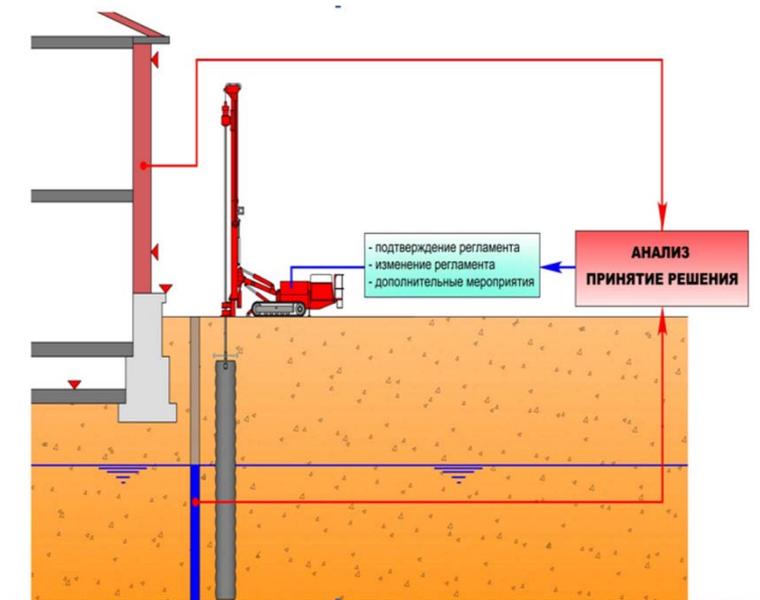


Рис.1. Схема мониторинга и принятия технологических решений.

Необходимость выполнения работ в неординарных, сложных и особо сложных условиях требует разработки и внедрения нестандартных инновационных решений как конструктивно-технологического, так и организационного характера. Этот постоянный процесс совершенствования работы организации возможен благодаря:

- применению новых материалов и оборудования в сочетании с традиционными;
- целенаправленному и системному совершенствованию технологии, и конструктивных решений, с учетом опыта реализации на предыдущих объектах, использованию скрытого потенциала и адаптации к изменившимся условиям нового объекта;
- внедрению в процесс строительства системы оперативного контроля за степенью и характером влияния выполняемых работ на окружающую среду в увязке с системой оперативного управления параметрами производственного процесса;
- включению в состав организации собственного научного подразделения и проектного института, реализующего задачи строительства путем оперативного проектирования.

Начиная с 90-х годов НПО «КОСМОС» начало активное внедрение в практику российского строительства новой и малоизвестной технологии струйной цементации грунтов.

Нами разработаны и применены различные модификации использования данной технологии как самостоятельно, так и в сочетании с другими технологиями и конструкциями, что позволяет решать широкий спектр задач, связанных с подземным строительством.

Огромный практический опыт использования технологии струйной цементации и наличие собственной научно-лабораторной базы позволили нам разработать и внедрить следующие, не имеющих аналогов, системы:

- определения оптимальных (применительно к стоящей конкретной задаче) параметров грунтоцемента (однородность, прочность, водонепроницаемость и т.д.) и методики их достижения;
- подбора составов и технологии производства соответствующих добавок;
- модификации оборудования;
- новые технологические регламенты.

На некоторых вариантах и аспектах применение технологии струйной цементации, реализованных нами на различных объектах, позволю себе остановиться в своем сообщении.

Использование технологии «JET-GROUTING» для ограждений котлованов.

При наличии котлованов глубиной до 10 – 12 метров ограждение стен может быть выполнено из армированных вертикальных грунтоцементных свай. В сухих грунтах эти сваи могут устраиваться в один ряд, в том числе с зазором между ними. В обводненных грунтах – в два и более рядов для обеспечения водонепроницаемости ограждения. Подобный тип конструкции позволяет исключить использование тяжелого технологического оборудования, что крайне важно при работе вблизи зданий, и существенно ускорить процесс устройства ограждения.

Конструкция ограждения в глубоких котлованах формируется из отдельно стоящих буронабивных свай в сочетании массивом из нескольких рядов (как правило, двух) вертикальных грунтоцементных свай (Рис. 2). В сухих и слабообводненных (Рис.3) грунтах буронабивные сваи могут устанавливаться с существенным зазором между собой (шаг свай в осях может достигать 2

м). В обводненных грунтах буронабивные сваи располагаются с минимальным межосевым расстоянием.

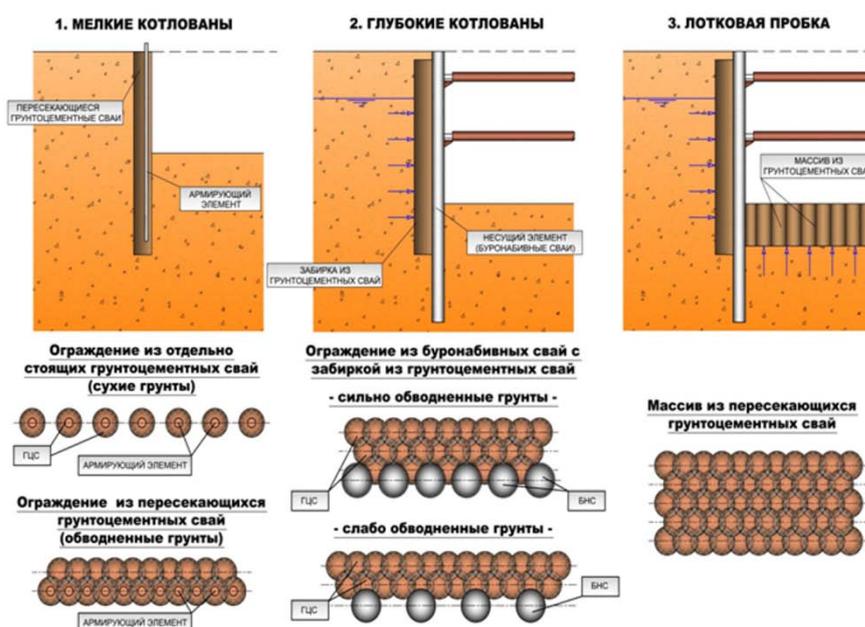


Рис. 2. Варианты использования технологии «JET-GROUTING» для создания ограждающих конструкций котлованов.



Рис.3. Пример использования комбинированной ограждающей конструкции (необводненные грунты).

Рассмотрим актуальность применения рассмотренной конструкции ограждения стен применительно к глубоким котлованам, вскрываемым в водонасыщенных грунтах, на следующих примерах.

Традиционно используемые конструкции ограждения стен котлованов (шпунт, «стена в грунте», буросекущиеся сваи) имеют ряд существенных недостатков. Шпунт не может быть использован в условиях плотной городской застройки, так как он слишком податлив и имеет недостаточную несущую способность при больших величинах бокового давления грунта. «Стена в грунте» не всегда хорошо формируется в условиях водонасыщенных песков и, в особенности, текучих супесей и суглинков. Буросекущиеся сваи имеют тенденцию к расхождению на большой глубине, и их устройство требует соблюдения жесткого регламента производства работ (разбуривание свай первого этапа не позднее определенного времени с момента их изготовления), который крайне трудно или невозможно выполнить при значительной глубине свай.

В отличие от традиционных конструктивных решений, применение ограждения (рис. 2) на основе сочетания буронабивных и грунтоцементных свай позволяет:

- создавать ограждения для котлованов любой глубины и в любых типах грунтов;
- создавать ограждения любой конфигурации в плане;
- устраивать ограждения в случаях невозможности выноса коммуникаций из зоны строительства;
- устраивать не только вертикальные, но и наклонные ограждения, в том числе и ограждения веерного типа;
- легко устранять обнаруженные дефекты ограждения путем устройства дополнительных грунтоцементных свай.

Горизонтальная плита из массива секущихся вертикальных грунтоцементных свай, устроенная в котловане позволяет:

- существенно снизить водоприток со стороны дна котлована, обеспечить возможности применения в котловане технологического оборудования, достичь требуемой устойчивости грунта в основании будущего сооружения, уменьшить глубину ограждающих конструкций стен котлована, так как исключается необходимость доведения низа ограждения до водоупора, что является одновременно и мероприятием по исключению барражного эффекта.

Вертикальные грунтоцементные сваи могут быть использованы также и для улучшения характеристик (лечения) ограждений (Рис. 4):

- создаваемых методом «стена в грунте» путем обработки зон стыков между секциями конструкции,
- из буресекущихся свай путем создание противофильтрационной завесы в зоне возможного расхождения буровых свай,
- шпунта для снижения деформативности ограждения.

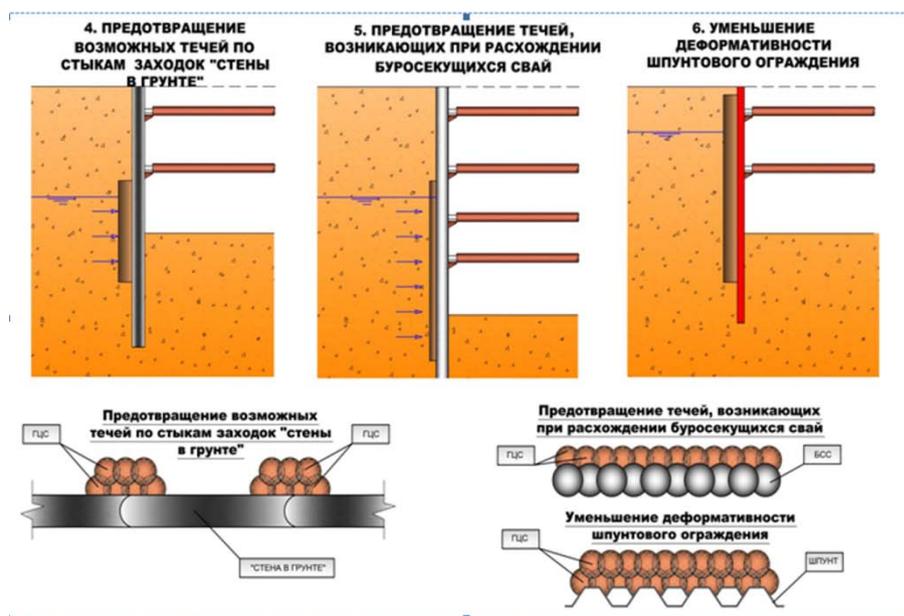


Рис. 4. Варианты использования технологии «JET-GROUTING» в сочетании со «стеной в грунте», буресекущимися сваями, шпунтовым ограждением.

Использование технологии «JET-GROUTING» для улучшения статической схемы работы ограждения стен котлованов.

При устройстве с поверхности земли до начала раскопки котлована горизонтального массива (пробки) из вертикальных грунтоцементных свай в зоне дна котлована, достигается создание элемента, выполняющего функцию распора для ограждающих стен. Подобное опережающее создание дополнительного опирания стен существенно снижает как деформации ограждения, так и величину максимального (то есть расчетного) изгибающего момента (Рис. 5).

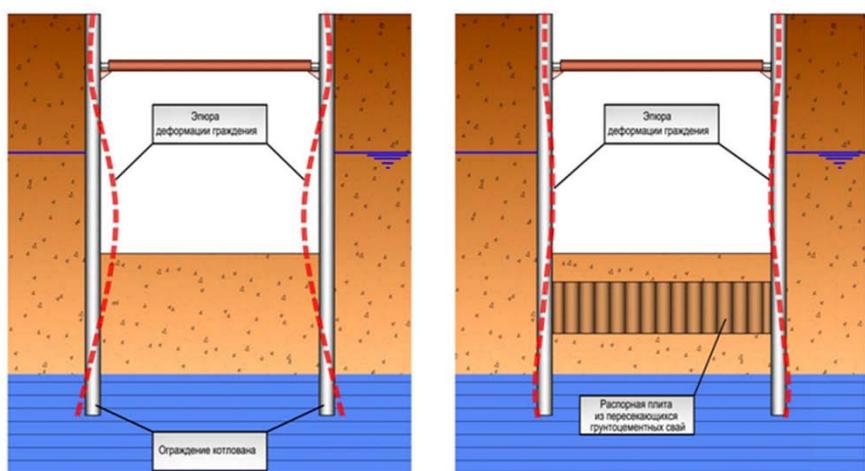


Рис.5. Повышение устойчивости котлована за счет закрепления грунта.

Создание за ограждением котлована грунтоцементного массива шириной, превышающей ширину призмы обрушения, позволяет исключить действие на ограждение котлована бокового давления грунта в пределах высоты массива (Рис. 6).

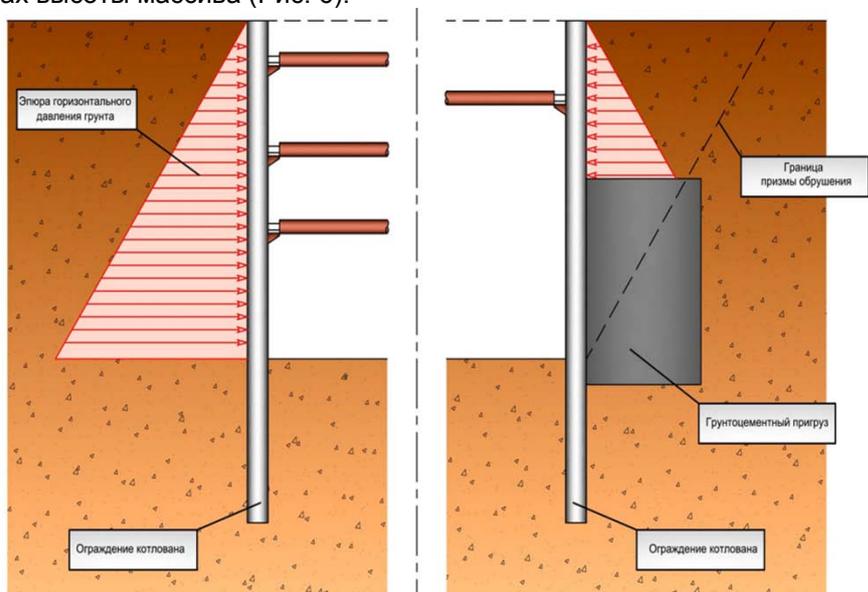


Рис.6. Улучшение статической схемы работы ограждения котлованов.

Дополнительные мероприятия, реализуемые при работе в непосредственной близости от фундаментов зданий.

При устройстве котлованов в непосредственной близости от фундаментов зданий, до начала работ по устройству ограждения котлована между фундаментом и будущим ограждением котлована создается отсечная стена из секущихся вертикальных грунтоцементных свай (Рис. 6). Устройство отсечной стены снижает вибрационные воздействия на фундамент от работы тяжелой буровой техники и локализует зону деформаций грунтового массива, которые могут появиться как в процессе устройства ограждения, так и в процессе раскопки котлована, в пределах зоны между ограждением и отсечной стеной.

С использованием оборудования по устройству грунтоцементных свай может производиться нагнетание растворов под подошву фундамента с целью повышения устойчивости его основания и компенсации возникших или ожидаемых деформаций фундамента.

При необходимости с использованием того же оборудования может быть выполнено усиление или реконструкция фундаментов (применение одного оборудования для производства буровых работ в зоне фундаментов и устройства свай с грунтоцементными опорными элементами).

Использование технологии «JET-GROUTING» при устройстве пригрузов для стартовых и приемных котлованов при щитовой проходке.

При проведении работ закрытой проходкой с помощью проходческих щитов очень важно создать необходимое давление при входе и сброс давления на выходе из грунтового массива. Для этой цели можно создавать пригрузки из вертикальных грунтоцементных свай для введения в грунтовой массив из стартового котлована и принятия из грунтового массива в приемный котлован проходческих щитов.

Использование технологии «JET-GROUTING» для горизонтального закрепления грунтов для обеспечения вертикальности забоя.

При проходке выработок под прикрытием опережающих защитных экранов (например, экранов из труб) существенным фактором, повышающим безопасность производства работ и снижающим их стоимость, является снижение и гарантированная фиксация величины рабочего пролета элемента защитного экрана в процессе разработки грунта. Это достигается путем закрепления грунтового массива горизонтальными грунтоцементными сваями (Рис.7). Сваи устраиваются с шагом в свету, сопоставимым с диаметром сваи, они могут быть пустыми, но могут и армироваться, например, трубками из фиброгласса. Подобное закрепление грунта при правильном назначении шага свай и характера армирующего элемента в зависимости от типа грунта и высоты забоя обеспечивает вертикальность грунтового массива в процессе его разработки.

Дополнительные мероприятия, повышающие безопасность производства работ.

Гибкость и простота использования технологии струйной цементации позволяет реализовывать огромный объем практических мероприятий, дающих возможность повысить безопасность производства работ.

Одним из примеров таких мероприятий является устройство вертикальных отсечных стен между железнодорожными путями в зоне последующего строительства под путями закрытым способом (с использованием экрана из труб) участка Муринского автодорожного тоннеля в Санкт-Петербурге. Создание рассечек гарантированно обеспечило величины рабочих пролетов труб экрана, что в свою очередь гарантированно ограничило величины внутренних усилий и деформаций элементов опережающего крепления в процессе проходки и возведения основной конструкции тоннеля.

Использование технологии «JET-GROUTING» при закрытой проходке тоннелей горным способом в водонасыщенных грунтах.

Рассмотрим способ прохождения закрытой проходки в водонасыщенных грунтах на примере строящегося в настоящее время в Москве Алабяно-Балтийского тоннеля, входящего в состав транспортной развязки в районе станции метро Сокол.

Трасса и элементы конструкции тоннеля располагаются на глубине до 40 метров в грунтах, водонасыщенных начиная с глубины около 7 метров от поверхности. Участок тоннеля расположен под действующими Волоколамским и Ленинградским автодорожными тоннелями, а также действующими перегонными тоннелями метрополитена. Под метрополитеном тоннель сооружается закрытым способом. Допустимая деформация конструкции метрополитена составляет 20 мм. В грунтовой массиве имеются оставленные при прежнем строительстве вертикальные стальные балки ограждения котлована. В подобных условиях применение технологий строительства, предусматривающих использования опережающих экранов из труб, продавливание или замораживание, оказалось невозможным. В связи с этим была принята схема строительства, предусматривающая:

- создание по бокам от зоны закрытой проходки стартовых котлованов,
- полное закрепление водонасыщенного грунта под перегонными тоннелями метрополитена путем создания из стартовых котлованов массивов из горизонтальных грунтоцементных свай,
- проходка в закрепленном массиве системы штолен горным способом с применением механизированного оборудования (горнопроходческих комбайнов),
- бетонирование в части пройденных штолен элементов конструкции тоннеля с последующим их объединением в единую конструкцию (Рис. 7).

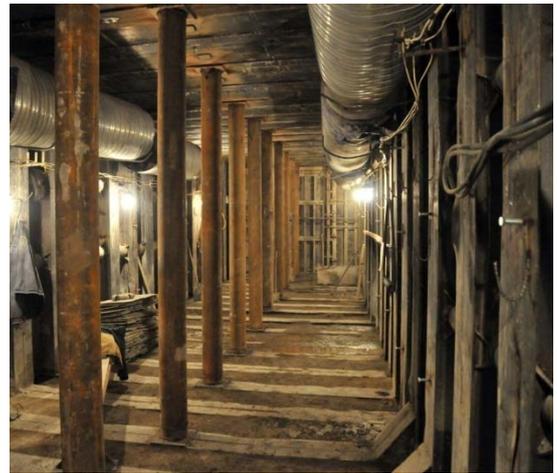
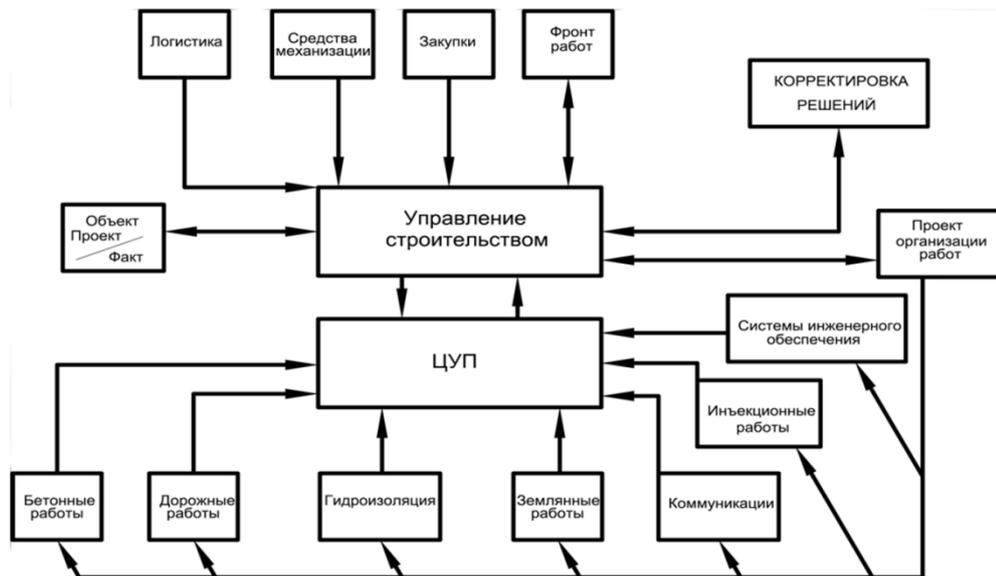


Рис. 7. Проходка штольни в закрепленном массиве.

Для уменьшения воздействия на конструкцию перегонных тоннелей метрополитена от процесса формирования грунтоцементных свай, используются разгрузочные скважины, позволяющие снимать избыточное давление. При необходимости производится дополнительная подкачка раствора в пространство между грунтоцементным массивом и конструкцией перегонных тоннелей. Для повышения безопасности производства работ в условиях необходимости соблюдения жестких требований по деформациям перегонных тоннелей метрополитена, а также учитывая повышенную степень ответственности при проведении работ на большой глубине в слабых обводненных грунтах вблизи зданий и действующих коммуникаций, была разработана и внедрена система оперативного реагирования на параметры складывающейся ситуации. (Рис. 8).



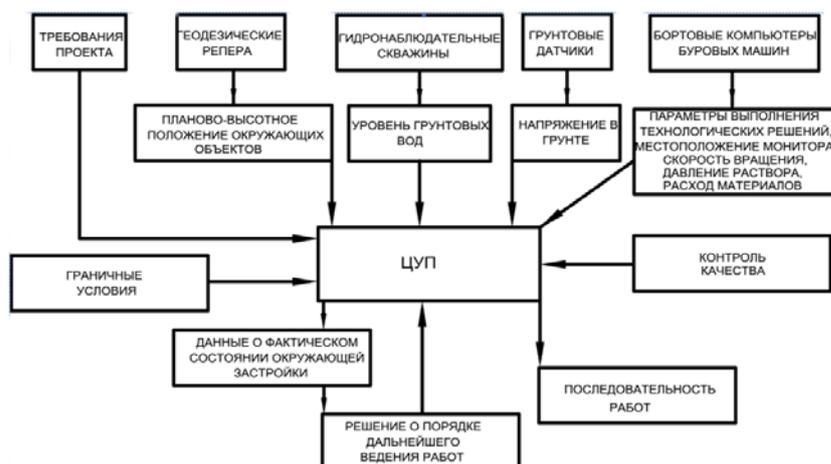


Рис. 8. Схема автоматизированного управления строительством.

Основным элементом этой системы является система мониторинга состояния конструкций метрополитена, зданий и коммуникаций, грунтового массива и грунтовых вод в увязке с фактическими параметрами технологических процессов. В реальном времени, на протяжении всего срока производства работ с геодезических реперов, гидронаблюдательных скважин, грунтовых датчиков, бортовых компьютеров буровых машин информация передается в единый центр (ЦУП, рис. 9), систематизируется и обрабатывается по специально разработанным программам, в обработанном виде транслируется на мониторы компьютеров и плазменные панели (Рис. 10). В случае превышения одним или несколькими факторами предельно допустимой величины, автоматически передается сигнал о возникновении нештатной ситуации. Принимается решение о методе преодоления нештатной ситуации (либо с использованием заранее разработанного алгоритма действия, либо путем экстренного привлечения соответствующего специалиста).



Рис. 9. ЦУП.



Рис. 10. Рабочее место оператора ЦУПа.

- модификация цементной суспензии для достижения проектных требований к закрепленному грунту

Грунтобетон, полученный методом струйной цементации, имеет различные физико-механические свойства (прочность, проницаемость, сдвигоустойчивость, кислотность и пр.) на различных участках грунтоцементного элемента. Закрепленный грунт, описанный выше, становится по своим характеристикам ближе к бетону, но количественные параметры этих новых свойств будут существенно зависеть от того, какой грунт подвергался обработке. Также следует отметить, что гидрогеология ситуация на строительном объекте изменяется в том числе и по глубине. Таким образом, для того, чтобы гарантированно получить диктуемые проектом свойства грунтобетона необходимо использовать химические добавки. В частности, такой добавкой служить комплексная добавка для струйной цементации (КДСЦ). Использование этой добавки позволяет ускорить процесс набора прочности грунтобетоном и получить более однородный материал (Рис. 11 и 12).

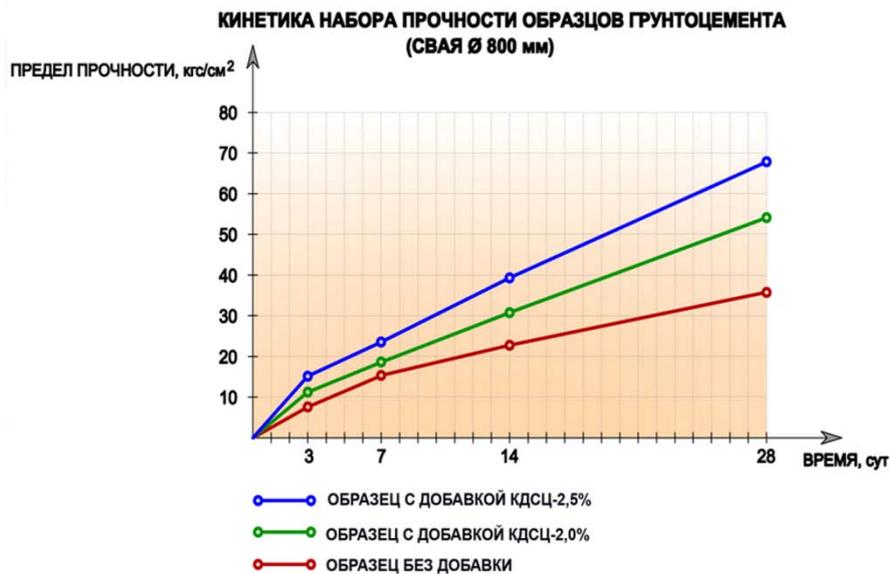


Рис. 11. Кинетика набора прочности образцов грунтобетона (свая диаметром 800 мм).

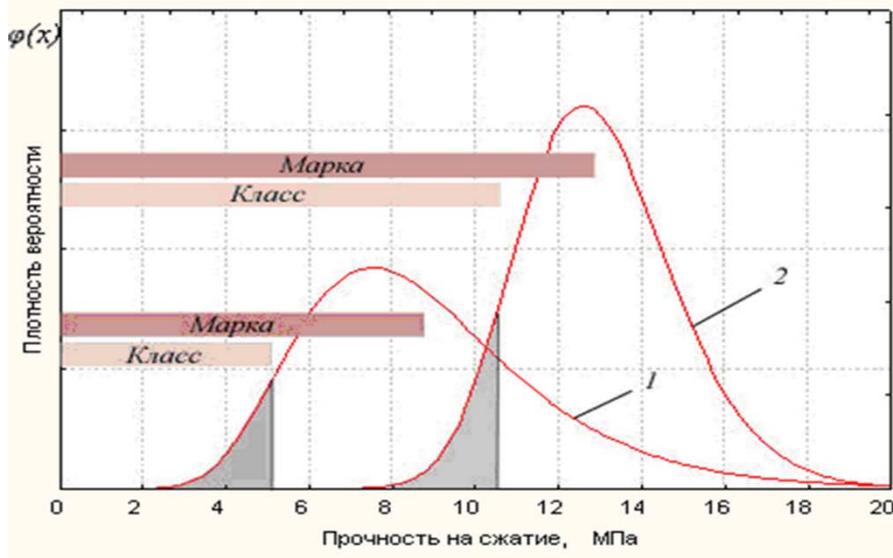


Рис. 12. Кривые распределения значений прочности, марки и класса грунтобетона.
Грунт-наполнитель – супесь. В/Ц=0,7.

Технология струйной цементации подразумевает использование цементной суспензии с водоцементным отношением (В/Ц) 0,9-1,2, далеким от оптимального, что, в свою очередь, существенно влияет на прочность и однородность получаемого грунтобетона. Использование добавки КДСЦ в составе инъекционного раствора позволяет снизить вязкость цементной суспензии и поверхностное натяжение на границе с частицами грунта. Эти свойства дают возможность увеличить проникновение цемента в грунт. А также снизить В/Ц (без угрозы проблем с оборудованием), что, в свою очередь позволяет при прочих равных увеличить прочность грунтобетона и однородность получаемого закрепленного грунта. Следует также отметить, что при работе в сильнообводненных грунтах и грунтах с содержанием органических остатков качественный грунтобетон без добавки КДСЦ получить просто невозможно.

Выводы:

1. Создан замкнутый производственный цикл, позволяющий выполнять работы по проектированию и строительству подземных объектов различного назначения, а также усиления и реконструкции фундаментов зданий в различных условиях, в том числе сложных гидрогеологических и градостроительных.
2. Разработаны и применены различные модификации использования технологии струйной цементации как самостоятельно, так и в сочетании с другими технологиями и конструкциями, что позволяет решать широкий спектр задач, связанных с подземным строительством.

3. На основании практического опыта использования технологии струйной цементации и наличие собственной научно-лабораторной базы позволили нам разработать и внедрить следующие, не имеющих аналогов, системы:

- определения оптимальных (применительно к стоящей конкретной задаче) параметров грунтоцемента (однородность, прочность, водонепроницаемость и т.д.) и методики их достижения;
- подбора составов и технологии производства соответствующих добавок;
- модифицирования оборудования;
- разработки новых технологических регламентов.

4. Разработана и внедрена система мероприятий, позволяющая производить работы по устройству коммуникаций в условиях постоянных динамических нагрузок (например, от транспортных средств) в условиях плотной городской застройки.

5. Создана автоматизированная система, управляющая строительством в режиме реального времени, позволяющая оптимизировать технологические процессы в зависимости от состояния окружающей среды и текущей обстановки в зоне производства работ.