

Проектирование и расчет подземных сооружений

Петрухин В.П., Разводовский Д.Е., Колыбин И.В., Кисин Б.Ф. (НИИОСП)

Современные города, как правило, не имеют возможности развиваться вширь, в связи с чем возникает необходимость роста этажности городской застройки и освоения подземного пространства. Появляются многочисленные многоэтажные подземные парковки, торговые центры, подземные дороги и развязки, и даже подземные офисы. Сейчас Москву невозможно представить без ТРК «Охотный ряд». Уже более 30 лет в Париже на месте знаменитого большого рынка "Чрево Парижа" существует подземный торговый центр с улицами, кинотеатром, бассейном, оранжереями, спортивным залом и парковкой. Под всем этим огромным городом – самая большая подземная дорожная развязка Парижа, городское и пригородное метро. В XXI веке Москву захлестнула волна освоения подземного пространства. Реконструкция ЦВЗ «Манеж», когда исторический памятник получил новую подземную часть,- типичный пример строительной практики последнего времени. Реконструкция площадей Павелецкого и Белорусского вокзалов с созданием многоэтажной подземной части - другой не менее важный пример, когда практически без изменения окружающей архитектуры город приобретает значительные площади. В 2007 году представители Московского правительства заявляли: «Под землей можно размещать до 70% всех гаражей, 80% складских помещений и 30% объектов сферы услуг».

Устройство одно-, двухэтажной подземной части при возведении новых зданий стало нормой современного строительства. В настоящий момент для инженера-геотехника проектирование 5-ти этажных подземных сооружений не является чем-то удивительным. Необходимость практических решений задач по устройству подземных сооружений становится одним из новых вызовов инженеру XXI века, который постепенно становится специалистом в области «высоких технологий».

Разработка технических решений по устройству подземных сооружений является достаточно сложной задачей, существенно отличающейся от традиционного проектирования наземных конструкций. Проработка проектов наземных конструкций имеет меньше неопределенностей, чем процесс разработки технических решений по устройству заглубленных сооружений. Для наземных конструкций разработаны и апробированы временем нормативные документы, касающиеся определения нагрузок и проектирования всех узлов и деталей возводимых зданий. За плечами проектировщиков стоит многовековой опыт возведения подобных конструкций. В процессе их проектирования могут быть достоверно определены, а в ходе строительства проверены физико-механические характеристики всех конструктивных материалов проектируемых

элементов. При проектировании заглубленных конструкций, взаимодействующих с окружающим грунтом, возникает большое количество неопределенностей, связанных с достоверным определением физико-механических свойств грунтов основания, величин активного и пассивного давления. Прочность конструктивных материалов, находящихся в теле подземных конструкций, связана с технологией их устройства, а величины усилий - с порядком их возведения. Сам процесс проектирования невозможен без досконального знания процесса производства работ, раздел ПОС и конструктивные решения разрабатываются совместно.

Сложность проектирования подземных сооружений выдвигает ряд требований, которые следует учитывать в работе:

- 1) Необходимо проведение большего объема инженерно-геологических изысканий, чем для возведения обычных сооружений. В ходе изысканий необходимо получить информацию о строении и свойствах грунтов на большую глубину.
- 2) Необходимо выполнение технических обследований близрасположенных зданий и сооружений в потенциальной зоне влияния подземного строительства.
- 3) Необходима работа проектировщика в тесном контакте со строительными организациями - производителями работ при разработке рабочего проекта. Конструктивные решения должны быть привязаны к техническим возможностям подрядной организации.
- 4) Применяемые конструктивные решения и технологии возведения подземных сооружений должны обеспечивать сохранность и нормальные условия эксплуатации окружающих наземных и подземных объектов, особенно памятников истории и архитектуры.
- 5) Должна быть выполнена разработка специфических разделов проекта по водопонижению и гидроизоляции, а также проведен численный прогноз влияния строительства на общую гидрогеологическую ситуацию с определением возможного барражного эффекта от строительства.
- 6) Требуется выполнение большого числа сложных геотехнических расчетов с привлечением специализированного программного обеспечения. По мнению специалистов, геотехнические расчеты представляют из себя в большей степени искусство, чем обычное решение технической задачи.
- 7) Должна анализироваться необходимость проектирования специальных мероприятий по инженерной защите существующих зданий, а также усилению их фундаментов и оснований.
- 8) При проектировании подземных сооружений необходимо разрабатывать специальный раздел проекта, касающийся проведения геотехнического

мониторинга, способного обеспечить как контроль в процессе выполнения принятых проектных решений, так и оперативную корректировку этих решений в случае необходимости.

- 9) Должны быть предусмотрены инженерные мероприятия, обеспечивающие экологическую защиту прилегающей территории от подтопления, загрязнения подземных вод и пр.
- 10) Требуется учитывать возможности новых строительных технологий, для которых не разработаны не только строительные нормы, но даже рекомендации. В проекте в таких случаях обычно задаются опытные участки, планируются экспериментальные и контрольные работы. Именно таким образом развивалось проектирование и строительство подземных конструкций способом jet-grouting (струйная технология).

Глубина проектируемых котлованов подземных сооружений доходит порой до 25-30 м, при этом отметка дна котлована почти во всех случаях находится ниже уровня подземных вод, а на прилегающей территории расположены жилые и исторические здания, коммуникации. Очевидно, что построить подземное сооружение в таких случаях невозможно без специальных методов и приемов. Обязательно должно быть рассчитано и запроектировано специальное ограждение котлована. В арсенале инженера-геотехника имеется большое количество способов устройства таких конструкций. Ограждения из металлического шпунта, труб, свай; ограждения, выполняемые по струйной технологии; ограждения, выполняемые способом «стена в грунте» и из буросекущихся свай, - вот неполный перечень способов устройства ограждающих конструкций котлованов. Процесс возведения в котловане подземной части здания, включающий множество технологических операций, иллюстрируется на рис. 1.



Рис 1. Процесс возведения в котловане подземной части здания.

При разработке проекта подземного сооружения крайне важным вопросом является

определение способа его устройства. Разработка грунта для возведения подземного сооружения может выполняться следующими приемами:

- в открытом котловане в классической последовательности «снизу-вверх»;
- закрытым способом «top-down»;
- комбинированным способом «semy top-down»;
- с устройством многоярусного крепления из металлических труб;
- с устройством многоярусного крепления грунтовыми анкерами или нагелями;
- с оставлением грунтовых берм и откосов и устройством подкосного крепления в фундаментную плиту или частично возведенные конструкции подземной части здания.

На выбор одной из указанных конструктивных схем и способа ведения работ влияют глубина и размеры котлована в плане, инженерно-геологические и гидрогеологические условия площадки строительства, наличие водоупорных слоев, необходимость передачи на ограждение вертикальных нагрузок, стесненность площадки строительства, наличие в непосредственной близости зданий и сооружений.

Каждый из способов крепления ограждения котлована имеет свои достоинства и недостатки. Сооружение подземных сооружений в открытом котловане обладает наименьшей стоимостью по сравнению с другими возможными вариантами. Однако применение указанного способа практически невозможно в условиях стесненной городской застройки и при высоком уровне подземных вод. Закрытый способ «top-down» и комбинированный способ «semy top-down» могут выполняться практически в грунтах любого типа. К недостаткам способа следует отнести его высокую стоимость и сложность разработки грунта через оставляемые технологические окна. Устройство многоярусного распорного крепления из металлических труб (рис. 2) является достаточно универсальным способом крепления ограждения, но при большой ширине котлована он становится слишком металлоемким и, потому, экономически нецелесообразным.



Рис 2. Крепление ограждения котлована путем устройства металлических распорок или подкосов в фундаментную плиту

Устройство крепления грунтовыми анкерами (рис. 3) наиболее удобно с точки зрения организации работ по экскавации котлована. Применение анкеров может быть ограничено стесненными условиями существующей застройки и инженерными коммуникациями. В настоящее время в условиях плотной застройки находят все более широкое применение извлекаемые анкера, демонтируемые после возведения каркаса подземной части здания, но в России опыт применения таких конструкций пока не слишком велик.



Рис. 3. Ограждение котлована с выполненным анкерным креплением.

Задачи подземного строительства сложны и разнообразны. Их решение невозможно без проведения комплексных расчетов. При проектировании подземных и заглубленных сооружений должны быть предусмотрены технические решения, обеспечивающие надежность, долговечность и экономичность проектируемых конструкций на всех стадиях строительства и эксплуатации. Указанная цель может быть достигнута путем выполнения расчетов подземных конструкций по первой и второй группам предельных состояний. Расчеты ограждений котлованов по первой группе предельных состояний включают в себя расчет общей устойчивости системы «грунтовое основание-подпорная конструкция» (рис. 4), расчет прочности грунтового основания и всех конструктивных элементов ограждения. Расчеты по второй группе предельных состояний включают в себя все виды расчета по деформациям, а также расчет по трещиностойкости для железобетонных элементов.

Простые инженерные методы определения внутренних усилий в гибких подпорных конструкциях, предполагающие возможность ручного аналитического или графоаналитического расчета, существуют только для ограждений котлованов, работающих по консольной схеме или имеющих не более двух ярусов крепления. Эти

методы не учитывают многих факторов, однако отсутствие мощной вычислительной техники в былые годы делало их единственным инструментом в руках инженеров-проектировщиков. Расчетная схема для определения внутренних усилий в ограждении котлована, работающего по консольной схеме, приведена на рис. 5.

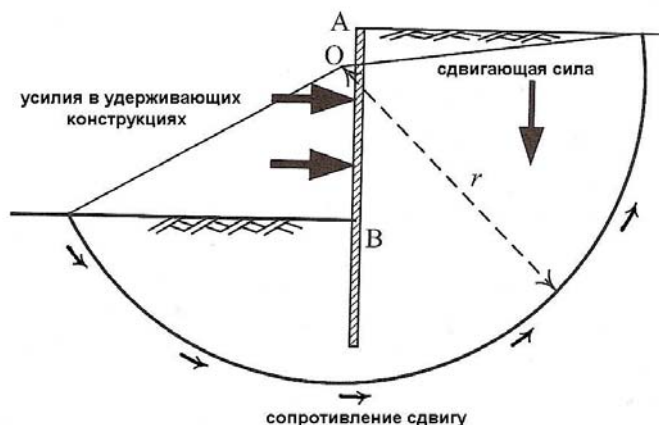


Рис. 4. Схема для расчета общей устойчивости системы «основание-ограждение котлована».

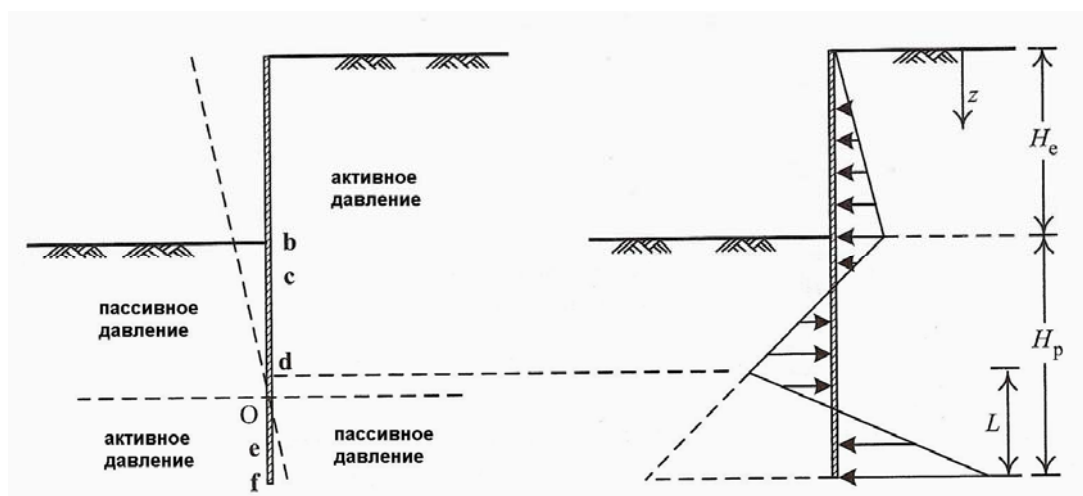


Рис. 5. Расчетная схема для определения усилий в консольном ограждении котлована.

Возросшая сложность современных задач проектирования делает затруднительным использование простейших инженерных методов для расчета ограждений котлованов с многоярусным креплением. В последнее время количество инженеров, использующих ручные методы расчета в своей деятельности, стремительно уменьшается. Для расчета прочности и устойчивости гибких подпорных стен ограждений котлованов сегодня обычно используется специальное геотехническое программное обеспечение, связывающее общепринятые методики определения активного и пассивного давления грунта с современным математическим аппаратом для нелинейных моделей основания.

Наибольшее распространение при проектировании глубоких котлованов в настоящее время получили численные методы расчёта, в которых рассматривается контактная задача взаимодействия гибкой подпорной конструкции с упруго-пластическим основанием, описываемым переменным коэффициентом постели. Для итерационного решения задачи используется классическое уравнение балки на упругом основании, в котором значения коэффициентов постели и правой части уравнения корректируются на каждом шаге итерации. Расчетная схема и алгоритм метода проиллюстрированы на рис 6. Из специализированных геотехнических программ, основанных на контактных моделях, следует выделить отечественные программы Wall-3 и PileWall, а за рубежом - ReWaRD, BMWALL, DEEP, MSheet.

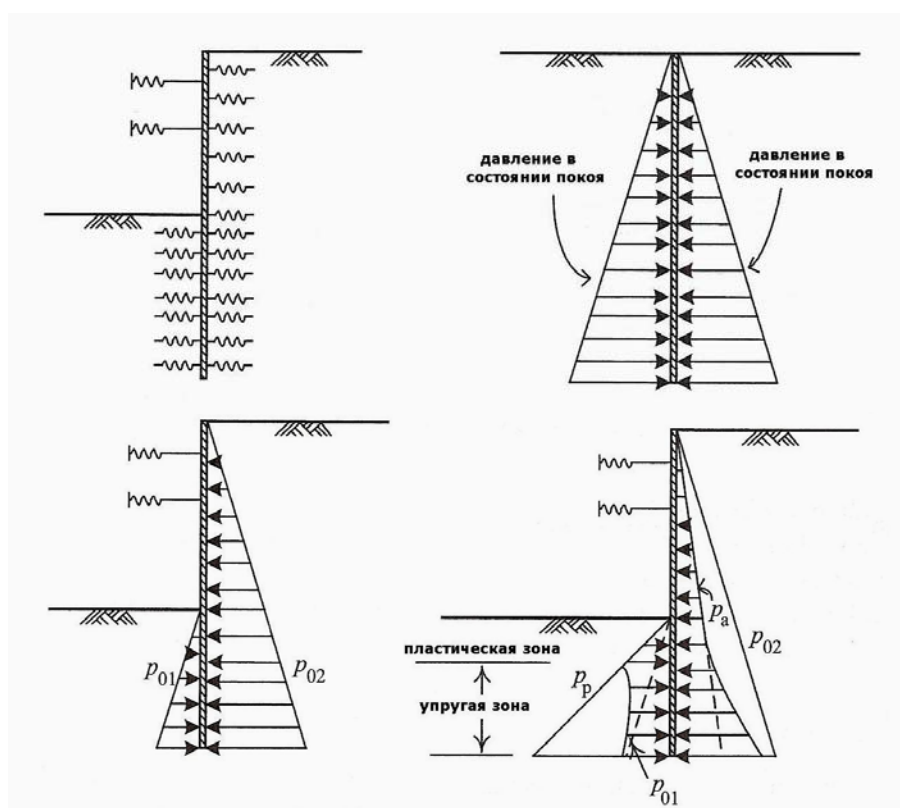


Рис. 6. Схема и алгоритм расчета ограждения котлована на основе контактной модели.

Для моделирования связи механической работы подземных сооружений с прилегающим грунтовым массивом используются численные методы (например, МКЭ, МГИУ, МКР). Очевидно, что проведение расчетов имеет массу нюансов, связанных с нелинейным поведением грунтов и скальных пород, в связи с чем их обычно выполняют специализированные организации. Широко используются конечно-элементные программы Plaxis (фирма Plaxis b.v.), Zsoil, Geoslope, FEModels, конечно-разностная программа FLAC и многие другие. Характерной особенностью геотехнического

программного обеспечения является возможность проводить расчеты с учетом стадийности устройства конструкции. Это очень важное условие, поскольку игнорирование стадийности устройства подземных сооружений может существенно исказить расчетные величины усилий в их конструкциях. Пример расчета ограждения котлована с многоярусным анкерным креплением приведен на рис. 7.

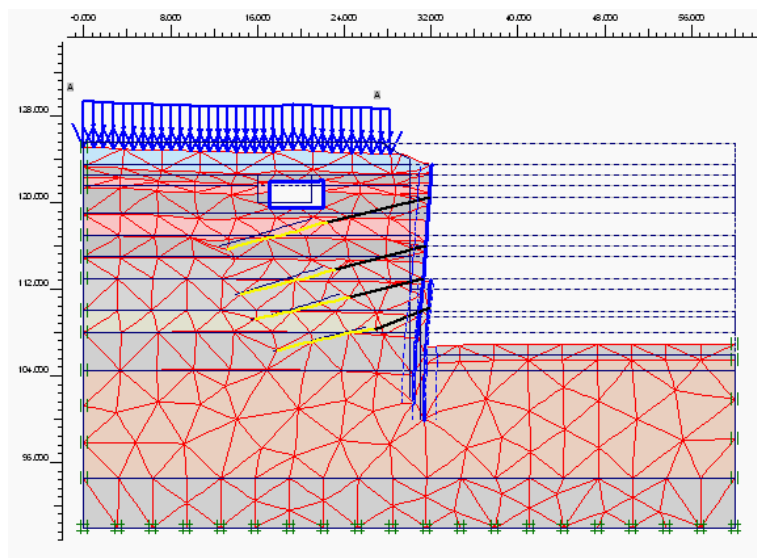


Рис. 7. Деформированная схема ограждения котлована с многоярусным креплением при расчете методом конечных элементов.

Важной группой расчетов ограждающих конструкций котлована являются задачи определения осадок и несущей способности конструктивных элементов, воспринимающих вертикальные нагрузки. К таким элементам могут быть отнесены ограждения котлованов при опирании на них надземных конструкций, а также сваи-колонны, устраиваемые при строительстве сооружений способом «сверху-вниз». Способы расчета таких конструкций близки к расчетам свайных фундаментов, но обладают особенностями, связанными с технологией их устройства.

При проектировании подземных сооружений в котлованах возникает необходимость выполнения ряда специфических расчетов. К таким расчётам относятся:

- Ранее уже упоминавшийся анализ общей устойчивости грунтового массива, включающего ограждающую конструкцию, который необходим для проверки достаточности глубины заделки стены в основание, а также надёжности способов крепления ограждающей конструкции.
- Расчет устойчивости стен траншеи, заполненной глинистым или бентонитовым раствором, на стадии устройства ограждения котлована способом «стена в грунте».

- Расчеты местной прочности основания при устройстве прерывистой ограждающей конструкции котлована.
- Расчеты устойчивости склонов, примыкающих к сооружению, откосов, бортов котлованов.
- Прогноз изменений гидрогеологического режима площадки строительства. Необходимость этого расчета связана с тем, что при строительстве подземных и заглубленных сооружений могут частично или полностью перекрываться естественные фильтрационные потоки в грунтовом массиве, а также изменяться условия и пути фильтрации подземных вод.
- Расчет фильтрационной прочности основания, давления подземных вод на конструкции подземного сооружения, фильтрационного расхода.

Как и любой процесс проектирования, разработка технических решений по устройству подземных сооружений может быть разбита на несколько этапов (рис. 8). Конечно, любая классификация достаточно условна, но, с нашей точки зрения, инженеру-проектировщику в своей работе над проектом следует пройти через следующие основные этапы:

Подготовительный этап. На данном этапе производится анализ архивных данных инженерно-геологических изысканий, составляется программа инженерно-геологический изысканий, необходимых для разработки проекта. Определяются здания и сооружения, которые должны быть обследованы. Задаются места откопки шурфов. Выбирается принципиальная схема устройства подземной части здания на основании технико-экономического сравнения возможных вариантов, уточняются плановые габариты возводимого подземного сооружения. Для определения возможных последствий могут проводиться предварительные расчеты влияния строительства по упрощенным зависимостям, полученным на основании обобщения данных мониторинга в регионе строительства [8].

Стадия «Проект». На указанной стадии производится анализ инженерно-геологических изысканий. Определяются предварительные глубины заложения ограждающих конструкций котлована. На данном этапе выбираются основные габариты ограждающих конструкций котлована, выбирается способ изготовления ограждающих конструкций. Принимаются принципиальные решения по выбору способа крепления ограждающих конструкций котлована, определяется количество ярусов их крепления. Проводятся расчеты ограждающих и распорных конструкций котлована. Выполняется моделирование влияния строительства на окружающую застройку и, при необходимости, разрабатываются принципиальные технические решения по инженерной защите зданий и

примыкающих коммуникаций. В случае необходимости дается задание на проведение дополнительных инженерно-геологических изысканий для стадии рабочего проектирования.

Стадия «Рабочая документация». На этой стадии уточняются проектные решения, принятые на стадии «Проект». Производятся окончательные расчеты всех основных несущих и распорных конструкций. Технология производства работ привязывается к технологическим возможностям конкретного подрядчика. Разрабатываются конструкции всех узлов и деталей сопряжений основных несущих элементов. Разрабатываются рабочие проекты усиления фундаментов и основных несущих конструкций рядом расположенных зданий, разрабатываются проекты защитных мероприятий: отсечные экраны, вертикальные и наклонные геотехнические барьеры и пр. Составляется проект и программа выполнения работ на опытных участках.

Техническое сопровождение проекта. На завершающей стадии принятые технические решения могут корректироваться в зависимости от результатов испытаний на опытных участках. Производится авторский надзор, научное сопровождение строительства и мониторинг. На основании этих работ в проект при необходимости вносятся оперативные корректировки.

Указанное выше разделение проекта на стадии достаточно условно. Основные технические решения, принимаемые при проектировании подземных сооружений и заглубленных частей зданий, как правило, должны обосновываться путем сравнения технико-экономических показателей возможных проектных вариантов. Эта работа должна выполняться на стадии «Проект» или на стадии предпроектных предложений. На указанных стадиях должны быть решены все принципиальные вопросы по размещению подземных сооружений, инженерной защите и т.д. Сам процесс технико-экономического сравнения вариантов является достаточно сложной задачей. Более дешевый по стоимости вариант может быть отвергнут, поскольку для производства работ потребуется слишком много времени. Кажущийся экономичным вариант строительства с устройством ограждения котлована из металлических труб и строительным водопонижением может оказаться неконкурентоспособным из-за высокой суммарной стоимости или невозможности отвода грунтовых вод.

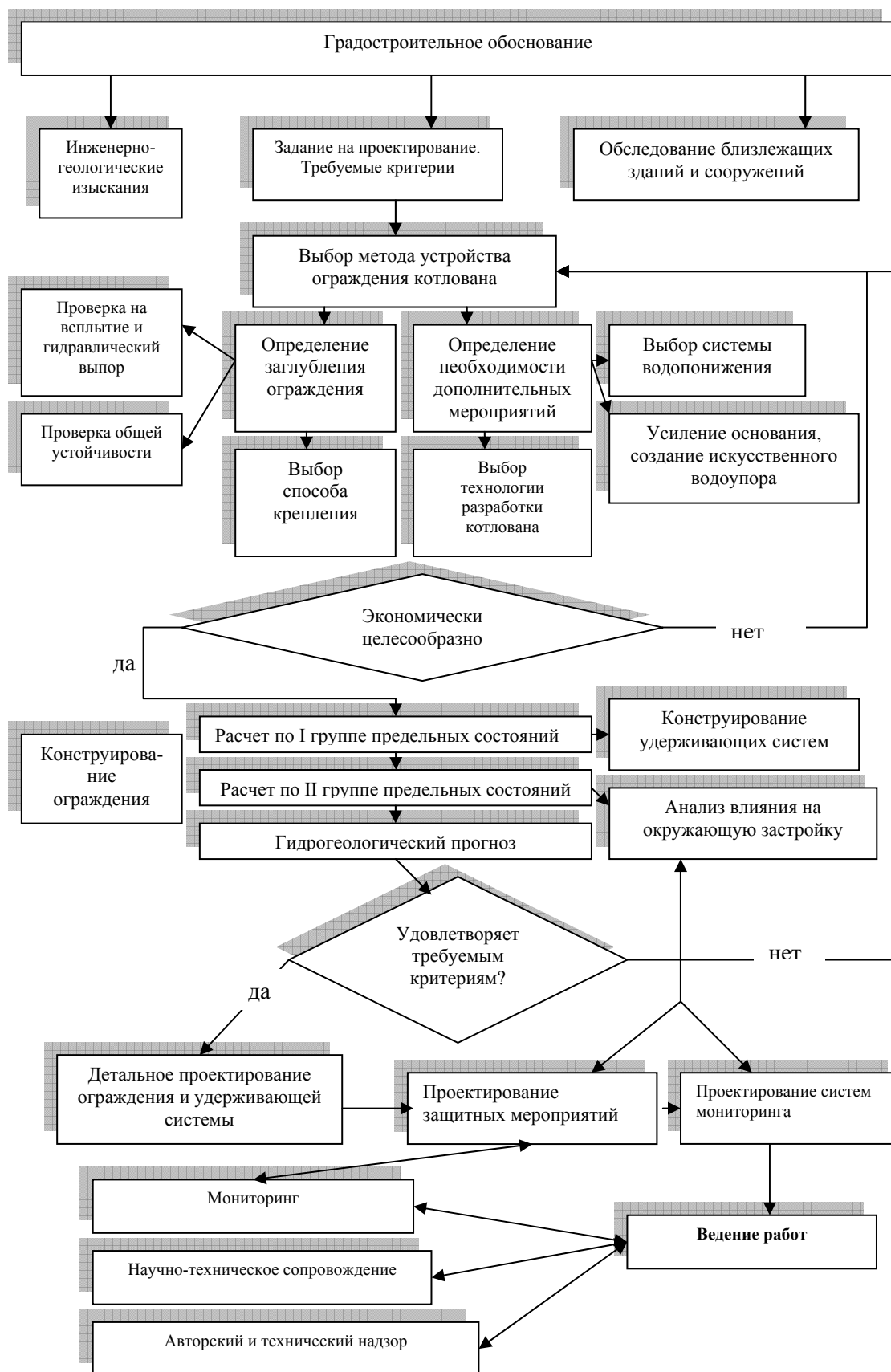


Рис 8. Блок-схема процесса проектирования подземных сооружений

Проектирование подземных и заглубленных сооружений должно выполняться в соответствии с действующими нормативными документами. Имеется значительное количество нормативных документов, требования которых должны учитываться при проектировании подземных и заглубленных сооружений [1-5], однако они не всегда в полной мере дают ответы на вопросы, встающие перед инженерами-геотехниками в процессе проектирования. В дополнение к требованиям, содержащимся в нормативной литературе, при проектировании подземных частей зданий и заглубленных сооружений необходимо учитывать некоторые дополнительные особенности. Инженер-проектировщик, как правило, вынужден использовать сложные специализированные программные комплексы. В конечном итоге, достоверность результатов расчета существенно зависит от квалификации и опыта инженера. Необходимо наличие специализированных геотехнических центров, аккумулирующих данные мониторинга и информацию о современных геотехнических технологиях. Незнание специфики современных технологий может приводить к возникновению необоснованных, а часто неправильных технических решений.

Необходима детальная специализированная экспертиза геотехнической части проекта подземного сооружения. Геотехническая экспертиза не является российским изобретением, она появилась в Голландии в XV веке. В то время Амстердам сгорел почти дотла. После этих страшных пожаров горожанам было предписано строить несущие стены домов из кирпича, а крыши класть из огнеустойчивых материалов. В связи с таким ростом нагрузок на фундаменты существенно увеличились осадки зданий, возникли многочисленные аварийные ситуации. Власти города постановили следить за строительством: была организована специальная комиссия для подробной проверки фундаментов, и возводить стены зданий без ее разрешения запрещалось. В Москве по сходным причинам также была организована геотехническая экспертиза проектов строительства подземных и заглубленных сооружений, которая многие годы выполняется силами НИИОСП им. Н.М. Герсванова.

Характерной особенностью проектирования заглубленных сооружений является необходимость разработки специального проекта мониторинга, входящего в состав рабочей документации. Мониторинг следует проводить не только за самим возводимым сооружением, но и за зданиями окружающей застройки и водонесущими подземными коммуникациями. К составлению указанного раздела проекта должны привлекаться специализированные организации. В составе проекта мониторинга определяются способы измерения деформаций распорных и анкерных конструкций и величин усилий в них, методы и точки определения напряженно-деформированного состояния примыкающего грунтового массива, способы и места фиксации уровня колебаний подземного сооружения

при его строительстве рядом с тоннелями метрополитена и другими источниками вибрационных и динамических воздействий.

Рабочая документация не может быть разработана без знания технологических возможностей подрядной организации, которая выбирается на основании данных, полученных на стадии «Проект». Разработка проектов подземных сооружений в одну стадию является исключением из правил.

При решении геотехнических задач подземного строительства часто возникают проблемы, которые ранее не анализировались инженерами. Для решения таких задач обычно бывает необходимо выполнение работ научно-технического сопровождения проекта специализированными научными организациями. При разработке проектов, предусматривающих применение новых технологий, на площадке должны быть организованы специальные опытные участки для уточнения технологических параметров производства работ, а специалистами-проектировщиками должны быть определены основные конструктивные и технологические требования.

Следует помнить, что компоновка подземной части здания может корректироваться в случае необходимости в зависимости от принимаемых геотехниками решений. При строительстве подземных сооружений способом «сверху-вниз» габариты колонн, устраиваемых буровым способом, их шаг и расстановка часто определяются не архитектором, а инженером-конструктором.

Котлован с анкерным креплением стенок удобен тем, что архитектура подземной части может меняться даже после завершения устройства котлована.

Состав проекта подземного сооружения может существенно отличаться и зависит от способа устройства и крепления ограждения котлована. В проект подземной части здания или сооружения на стадии «Проект» обычно входят принципиальные конструктивные решения по устройству ограждающей конструкции котлована и распорной системы. Даются принципиальные разрезы и уточняются отметки заглубления ограждения. На стадии рабочего проектирования разрабатываются чертежи армирования, а также все узлы и детали проектируемой конструкции. При разработке проекта ограждения, выполняемого способом «стена в грунте», дается также план разбивки стены на заходки. Наиболее сложными являются проекты, разрабатываемые для устройства подземных сооружений, возводимых способом «сверху-вниз». Указанные проекты содержат не только технические решения по устройству ограждения котлована и фундаментов, но и армирование перекрытий, конструкции временных или постоянных опор. Наиболее просты проектные решения по устройству ограждений котлованов, работающих по консольной схеме. Такой проект может состоять всего из нескольких листов. Определенную сложность для проектирования представляют конструкции

анкерного крепления. Известно, что несущая способность грунтовых анкеров не может быть однозначно определена расчетом. Фактически каждая фирма-изготовитель имеет свою собственную особенную конструкцию анкера. В проекте, таким образом, необходимо указать только расчетные величины усилий, передаваемых на анкеры. Также задаются шаг и свободная длина анкеров, угол их наклона к горизонту. Проектировщиком должна назначаться программа испытаний анкеров для подтверждения их несущей способности. Конструкция анкера и технология его устройства (рис. 9) определяется чаще всего подрядной организацией, которая должна гарантировать соблюдение требований, содержащихся в проекте.



Рис 9. Процесс устройства грунтовых анкеров.

Процесс проектирования подземных сооружений не заканчивается выпуском рабочей документации. В грунте могут находиться нигде не зарегистрированные коммуникации, полости, старые фундаменты и подземные части снесенных строений, не выявленные в процессе изысканий прослойки слабых грунтов, валуны и т.д. В этом случае проектировщику в процессе авторского надзора приходится вносить в принятые проектные решения оперативные изменения или существенные корректировки. Иногда корректировки приходится вносить на основании данных мониторинга, когда фактические величины осадок рядом расположенных зданий достигают критических значений. Геотехническая часть проекта заканчивается только с полным окончанием строительных работ на площадке.

Здесь представлен лишь неполный перечень проблем, стоящих перед инженером-геотехником в процессе проектирования подземных и заглубленных сооружений. В небольшой статье невозможно детально описать все многообразие вопросов, которые должны быть решены при освоении подземного пространства. Дорогу осилит идущий. Уже сегодня в России накоплен большой опыт и существует твердая уверенность, что

любые, даже самые сложные объекты подземного строительства могут быть успешно воплощены в жизнь.

Литература

1. СНиП 2.02.01-83*. Основания зданий и сооружений. М.: Стройиздат, 1985.
2. СНиП 2.02.03-85. Свайные фундаменты. М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1986.
3. СНиП 2.06.07-87. Подпорные стены, судходные шлюзы, рыбопропускные и рыбозащитные сооружения. М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1987.
4. СП 50-101-2004. Проектирование и устройство оснований и фундаментов зданий и сооружений. М., 2005.
5. МГСН 2.07-01. Основания, фундаменты и подземные сооружения. М.: Москомархитектура, 2003.
6. Основания, фундаменты и подземные сооружения. Справочник проектировщика. М.: Стройиздат, 1985.
7. Драновский А.Н., Фадеев А.Б. Подземные сооружения в промышленном и гражданском строительстве. Издательство Казанского университета, 1993.
8. Ильичев В.А., Коновалов П.А., Никифорова Н.С. Исследование влияния строящихся заглубленных сооружений на деформации близрасположенных зданий. М., «Основания, фундаменты и механика грунтов», 2002, № 4.
9. Chang-Yu Ou. Deep Excavations. Theory and Practice. London: Taylor & Francis, 2006.