Минобрнауки России

Федеральное государственное бюджетное

образовательное учреждение высшего образования

«Оренбургский государственный университет»

Кафедра строительных конструкций

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ**

для обучающихся по дисциплине

*«М.1.В.ДВ.2.2 Проектирование подземных сооружений городов»*

Уровень высшего образования

МАГИСТРАТУРА

Направление подготовки

*08.04.01 Строительство*

(код и наименование направления подготовки)

*Теория и проектирование зданий и сооружений*

(наименование направленности (профиля) образовательной программы)

Тип образовательной программы

*Программа академической магистратуры*

Квалификация

*Магистр*

Форма обучения

*Очная*

Оренбург 2023

Методические указаниярассмотрены и утверждены на заседании кафедры строительных конструкций протокол №14 от "13 " февраля 2023 г.

Заведующий кафедрой

строительных конструкций В.И. Жаданов

*Исполнитель:*

профессор С.Б.Колоколов

В методических указаниях приводится извлечение наиболее важных моментов из нормативного документа СП 248.1325800.2016 Свод правил. Сооружения подземные. Правила проектирования. Underground structures. Design principles. Дата введения 2016-09-01. 111с.

**1 Основные требования при проектировании подземных сооружений городов**

Номенклатура объектов по их назначению, размещаемых в подземном пространстве городов, включает в себя:

- гражданские сооружения жилого, административного назначения и сферы

обслуживания, спортивные сооружения;

- сооружения промышленного назначения;

- транспортные сооружения и пешеходные переходы;

- гидротехнические сооружения;

- инженерные сооружения и сети;

- многофункциональные комплексы.

В зависимости от пространственной компоновки подземные сооружения

подразделяются на линейные (протяженные объекты и их комплексы: тоннели, подземные переходы, инженерные сети и др.) и компактные (локальные отдельно стоящие объекты и их комплексы).

При проектировании подземных сооружений должны быть предусмотрены решения:

- обеспечивающие надежность, долговечность и экономичность на всех стадиях строительства и эксплуатации сооружений;

- не допускающие ухудшения условий эксплуатации существующих зданий,

сооружений и инженерных коммуникаций (далее - окружающая застройка);

- не допускающие вредных воздействий на экологическую среду;

- допускающие перспективное применение подземного пространства

города.

Подземные сооружения в городской среде проектируют таким образом, чтобы минимизировать негативное влияние их строительства и эксплуатации на окружающую застройку. При выборе проектных решений необходимо оценивать сопоставимый опыт строительства, в первую очередь на близлежащих площадках. При проектировании подземных сооружений учитываются не только их влияние на существующие сооружения и коммуникации, но и возможное влияние окружающей застройки и городской инфраструктуры на проектируемое сооружение, а также перспективы развития подземной инфраструктуры города.

Проектирование подземных сооружений осуществляют на основании технического задания на проектирование на основании следующей исходной документации:

- отчеты об инженерных изысканиях (инженерно-геодезических, инженерно-геологических, инженерно-геотехнических, инженерно-экологических);

- инженерная цифровая модель местности с отображением подземных и надземных сооружений и коммуникаций;

- отчеты о техническом обследовании эксплуатируемых зданий и сооружений окружающей застройки в зоне влияния строительства;

- проекты строящихся зданий и сооружений в зоне влияния строительства;

- результаты стационарных наблюдений и мониторинга (при строительстве на территориях с проявлениями опасных геологических и инженерно-геологических процессов);

- технические условия, разработанные всеми уполномоченными заинтересованными организациями.

При проектировании подземных сооружений проверяются две группы предельных состояний:

- первая группа предельных состояний - состояния строительных объектов, достижение которых ведет к потере несущей способности строительных конструкций или основания, к невозможности эксплуатации сооружения;

- вторая группа предельных состояний - состояния, при достижении которых нарушается нормальная эксплуатация сооружений, исчерпывается ресурс долговечности конструкций, нарушаются условия комфортности.

Для подземных сооружений к первой группе предельных состояний относятся:

- потеря устойчивости (равновесия) сооружением и основанием, которые рассматриваются как жесткое тело, при недостаточном сопротивлении конструктивных материалов и грунтов основания для обеспечения равновесия;

- внутреннее разрушение сооружения или его конструктивных элементов, т.е. ситуации, в которых прочность конструктивных элементов важна для обеспечения сопротивления;

- разрушение или чрезмерные деформации основания, т.е. ситуации, в которых прочность грунта важна для обеспечения сопротивления;

- потеря равновесия сооружением или основанием из-за увеличения давления воды (взвешивания) или иными направленными вверх воздействиями;

- гидравлический подъем в основании, внутреннюю суффозию и прочие явления, связанные с наличием гидравлических градиентов.

Ко второй группе предельных состояний относятся:

- достижение предельных деформаций конструкций подземного сооружения или основания, устанавливаемых исходя из конструктивных, технологических или эстетико-психологических требований;

- образование трещин, не нарушающих нормальную эксплуатацию объекта, или достижение предельной ширины раскрытия трещин;

- достижение предельных деформаций окружающей застройки, расположенной в зоне влияния;

- недопустимые уровни вибрационных воздействий;

- недопустимое влияние на гидрогеологические и экологические условия;

- прочие явления, при которых возникает необходимость ограничения во времени эксплуатации подземного сооружения (например, коррозионные повреждения).

Проектирование с применением расчетов - основной способ обеспечения требований надежности подземных сооружений и может выполняться для объектов любой геотехнической категории. Если прогноз поведения подземного сооружения, выполненный на основании расчетных или экспериментальных работ, затруднен, то допускается применять наблюдательный метод, который предполагает возможность корректировать проект в процессе строительства на основании результатов геотехнического мониторинга. Мониторинг на площадке должен однозначно устанавливать, находятся ли контролируемые характеристики в допустимых пределах. Он должен выполняться с начальной стадии строительства, с регулярностью, позволяющей предпринять необходимые действия в случае превышения допустимых пределов. Результаты мониторинга анализируются поэтапно по мере их поступления. Намеченные мероприятия по корректировке проекта следует выполнять незамедлительно в случае превышения контролируемыми характеристиками допустимых пределов.

Проектирование с применением наблюдательного метода рекомендуется выполнять при научно-техническом сопровождении высококвалифицированных специализированных организаций. Наблюдательный метод не следует применять при значительных рисках возникновения аварийных ситуаций.

При выполнении расчетов в целях обеспечения надежности конструкций и оснований необходимо проверять, чтобы расчетные значения усилий, напряжений, деформаций, перемещений, раскрытий трещин не превышали соответствующих им предельных значений, установленных нормами проектирования. Расчеты выполняются с применением адекватных расчетных методов и моделей, отражающих действительные условия работы подземных сооружений в их взаимодействии с основанием и соответствующих рассматриваемой проектной ситуации или сценарию.

Для выполнения расчетов должны быть заданы:

- нагрузки и воздействия, а также их сочетания;

- свойства материалов конструкций;

- свойства грунтов и массивов скальных грунтов;

- геометрические данные;

- предельные значения деформаций, раскрытия трещин, вибраций и пр.

- расчетные модели, устанавливающие связь результатов расчета с

исходными данными.

Расчетная модель может быть:

- аналитической;

- полуэмпирической;

- численной.

Численные модели, преимущественно применяемые для расчета подземных сооружений, подразделяются на контактные модели и модели сплошной среды. Контактные модели учитывают взаимодействие конструкций сооружения с основанием на контакте "сооружение-грунт", однако напряженно-деформированное состояние массива грунта не рассматривается. В моделях сплошной среды рассматриваются подземное сооружение и окружающий массив грунта в пределах расчетной области и анализируется их совместное напряженно-деформированное состояние.

Нагрузки и воздействия, учитываемые при проектировании подземныхсооружений, следует устанавливать расчетом, как правило, на базе рассмотрения совместной работы сооружения и основания с учетом возможного их изменения на различных стадиях возведения и эксплуатации сооружения. Нагрузки и воздействия на основание, подземное сооружение или его отдельные конструктивные элементы, коэффициенты надежности по нагрузке,а также возможные сочетания нагрузок и коэффициенты сочетаний следует принимать согласно нормативным требованиям.

При определении нагрузок и воздействий на основание и подземные сооружения к постоянным нагрузкам относятся:

- вес конструкций сооружения;

- вес грунта засыпки;

- вес зданий и сооружений, находящихся в зоне их воздействия на подземное сооружение;

- давление грунта и напряжения в основании в долговременных ситуациях;

- давление подземных вод и фильтрационные силы при установившемся режиме;

- усилия предварительного напряжения в постоянных конструкциях.

К временным длительным нагрузкам и воздействиям относятся:

- вес стационарного оборудования;

- давление грунта и напряжения в основании в кратковременных ситуациях;

- снятие нагрузки при выемке грунта;

- давление подземных вод и фильтрационные силы при неустановившемся режиме, избыточное поровое давление;

- давление воды внутри подземного сооружения;

- вибрационные воздействия от оборудования и транспорта;

- нагрузки от складируемых на поверхности грунта материалов;

- температурные воздействия в период эксплуатации, включая температурные воздействия от транспортируемых жидкостей и газов;

- усилия во временных анкерах и распорных конструкциях;

- нагрузки, обусловленные изменением влажности, усадкой и ползучестью материалов;

- силы морозного пучения грунта;

- деформации основания, вызванные подработкой или устройством котлованов;

- деформации основания, вызванные ухудшением свойств грунта и не сопровождающиеся коренным изменением структуры грунта.

К кратковременным нагрузкам и воздействиям относятся:

- транспортные нагрузки в пределах подземного сооружения;

- давление грунта, вызванное транспортными нагрузками на земной поверхности;

- нагрузки и воздействия в процессе сооружения тоннеля: давление щитовых домкратов, усилия от веса и воздействия проходческого и другого строительного оборудования;

- давление пульсации потока и гидравлического удара в водонесущих сооружениях;

- давление растворов при цементации;

- температурно-климатические воздействия в период строительства и пр.

Расчетная модель должна адекватно описывать принятое механическое поведение основания и/или конструкций подземного сооружения для рассматриваемого предельного состояния и характера нагружения. При отсутствии надежной расчетной модели для конкретного предельного состояния следует выполнять расчет с применением нескольких расчетных схем или моделей, чтобы вероятность достижения этого предельного состояния была минимальна. Любая расчетная модель должна быть основана на математически точном аналитическом решении или давать погрешность в запас надежности. Если при расчете применяют эмпирическую зависимость, то должны быть четко оговорены границы ее применения и однозначно установлено, что она соответствует преобладающим грунтовым условиям. Если при расчете применяют аналитическую модель, то должно быть четко установлено ее соответствие предельному состоянию, относительно которого выполняется проверка.

При выборе расчетной модели следует учитывать, какой кратковременной или долговременной проектной ситуации она должна соответствовать. Расчетная модель должна учитывать возможность выполнения поэтапного расчета для проектных сценариев в том случае, если стадийность и очередность возведения подземного сооружения влияют на напряженно-деформированное состояние основания и самого сооружения. Модели взаимодействия конструкций с основанием должны учитывать не только совместность их деформаций, но и возможность нарушения такой совместности на контакте "конструкция - грунт". В качестве нарушений совместности деформаций следует рассматривать проскальзывание и отлипание. Условие проскальзывания – равенство касательных напряжений на контакте "конструкция - грунт" предельному значению. Условие отлипания соответствует невозможности возникновения растягивающих нормальных напряжений на контакте.

Основные модели сплошной среды, описывающие механическое поведение грунтов, которые рекомендуется применять в расчетах подземных

сооружений:

- линейно-упругая модель (Гука);

- модель упруго-идеально-пластической среды (Мора-Кулона) с ассоциированным или неассоциированным законом пластического течения.

- упруго-пластические модели с упрочнением, как правило, с замкнутой поверхностью текучести, которые наиболее уместны в задачах, где нужно учесть различие свойств грунта при нагружении и разгрузке;

- реологические модели, позволяющие описывать развития деформаций и напряжений во времени;

- модель упруго-идеально-пластической среды с критерием прочности Хоека-Брауна, описывающая поведение изотропных массивов скальных и полускальных грунтов различной степени трещиноватости.

**2 Проектирование тоннелей**

Требования распространяются на проектирование тоннелей и тоннельных сооружений (далее - тоннели) различного назначения, устраиваемых закрытым способом. Проектные решения должны обеспечивать прочность, устойчивость, пригодность к эксплуатации и долговечность конструктивных элементов тоннелей, устойчивость оснований, безопасность выполнения строительных работ, нормальные условия эксплуатации окружающей (расположенной над тоннелем) застройки и отсутствие вредных воздействий на геологическую и гидрогеологическую среды.

К геотехническим задачам проектирования тоннелей относятся:

- выбор очертания поперечного сечения тоннеля и глубины его заложения;

- выбор способа проходки и устройства конструкций тоннеля;

- определение необходимости и конструктивных параметров временной крепи тоннеля;

- определение конструктивных параметров постоянной обделки тоннеля;

- оценку влияния строительства на окружающие среду и застройку;

- выбор средств и разработку программы контроля и мониторинга.

Внутренние размеры поперечных сечений тоннелей и притоннельных сооружений определяются в зависимости от их функционального назначения. В большинстве случаев принимается форма поперечного сечения тоннелей кругового или сводчатого очертания. Материалы и тип обделки выбирается в в зависимости от функционального назначения тоннеля.

Способ проходки тоннеля и горнопроходческое оборудование выбирается в зависимости от инженерно-геологических и гидрогеологических условий по трассе тоннеля, их изменчивости, глубины заложения тоннеля, его поперечных размеров и формы, условий градостроительной и экологической ситуации, оценки рисков, а также на основании технико-экономического сопоставления вариантов. В городских условиях для устройства тоннелей под застроенными территориями рекомендуется применять механизированные щитовые комплексы с уравновешиванием давления в призабойной зоне с помощью гидравлического или грунтового пригруза.

Процесс проектирования должен быть основан на результатах инженерно-геологических изысканий, выполнении расчетов, результатах экспериментальных работ, учете сопоставимого опыта строительства в схожих инженерно-геологических условиях, результатах натурных измерений и наблюдений в процессе проведения работ.

При проектировании тоннелей следует выполнять расчеты их конструкций и оснований по двум группам предельных состояний, рассматривая все возможные кратковременные и долговременные проектные ситуации и их сценарии как в строительный, так и в эксплуатационный период. Рассматриваются, как минимум, следующие проектные ситуации и предельные состояния, соответствующие периоду строительства тоннеля:

- разрушение основания (вывал) при незакрепленной или недостаточно

закрепленной площади в забое или своде тоннеля;

- поступление подземных вод в забое или своде тоннеля;

- всплытие тоннеля;

- разрушение, потеря устойчивости или недопустимые деформации

временной крепи (EQU, STR, SLS);

- разрушение, потеря устойчивости или недопустимые деформации

устраиваемой обделки или ее фрагмента;

- недопустимые деформации грунтового массива, осадки поверхности или

деформации окружающей застройки;

- недостаточное или избыточное давление пригруза в призабойной камере

механизированного щитового комплекса;

- недостаточное или избыточное давление щитовых домкратов;

- недостаточное или избыточное давление нагнетания раствора за обделку.

Рассматриваются также следующие проектные ситуации и предельные состояния, соответствующие периоду эксплуатации тоннеля:

- разрушение или потеря устойчивости обделки тоннеля;

- избыточные напряжения в элементах обделки тоннеля;

- чрезмерные деформации обделки тоннеля;

- потеря герметичности тоннеля;

- потеря эксплуатационных качеств тоннеля;

- всплытие тоннеля;

- изменения гидрогеологических условий в результате строительства;

- недопустимые деформации грунтового массива, осадки поверхности или

деформации окружающей застройки;

- коррозия, вызванная агрессивной средой.

Расчетные модели должны учитывать:

- неоднородность геологического строения вдоль трассы протяженного

сооружения;

- начальное напряженно-деформированное состояние грунтового массива;

- поровое давление в грунтовом массиве;

- нарушения структуры грунта в зависимости от способа работ;

- влияние способа работ на изменение напряженно-деформированного

состояния грунтового массива;

- пространственный характер задачи при сопряжении тоннельных

конструкций;

- пространственное и временное чередование этапов производства работ;

- наличие или отсутствие условий симметрии;

- взаимное влияние рядом расположенных тоннелей;

- температурный режим в тоннеле при его эксплуатации.

Расчет устойчивости основания при незакрепленной площади в забое и/или своде тоннеля производится методами теории предельного равновесия или численного моделирования методом конечных элементов. Рекомендуется выполнять расчет на основании трехмерных моделей, учитывающих пространственность задачи. В простых случаях можно применять численные модели с заданной нагрузкой, основанные на положениях строительной механики. В этом случае расчеты выполняются с применением контактных моделей стержневых конструкций на основании, описываемом коэффициентом упругого отпора. Обделки тоннелей желательно рассчитывать с учетом нелинейных деформационных свойств материалов конструкций. На начальных стадиях проектирования допускается определять усилия в элементах конструкций и их деформации на основании применения линейных зависимостей между напряжениями и деформациями.

**3 Проектирование конструкций подземных сооружений**

Конструктивные решения подземных сооружений должны удовлетворять следующим требованиям:

- исключать возможность мгновенного (хрупкого) или прогрессирующего разрушения сооружения при аварийных воздействиях;

- обеспечивать по возможности доступ к конструкциям в процессе эксплуатации;

- обеспечивать доступ к средствам и системам мониторинга;

- обеспечивать ремонтопригодность конструкций;

- учитывать возможность изменений гидрогеологических условий;

- учитывать при необходимости возможность ремонта и перекладки подземных коммуникаций;

- учитывать при необходимости возможность влияния соседних объектов, планируемых к строительству.

При проектировании конструкций подземных сооружений следует учитывать их механическое взаимодействие с примыкающим массивом грунта, подземными водами, зданиями и сооружениями окружающей застройки. Необходимо учитывать проектные сценарии в процессе строительства, а также возможные изменения нагрузок, воздействий и деформационных характеристик основания в процессе эксплуатации сооружения.

Проектирование конструкций подземных сооружений следует выполнять на основании их расчетов, а также дополнительных предписаний, определяющих требования к строительным материалам, водонепроницаемости, долговечности, защите от агрессии, пожарной безопасности и пр. Перекрытия подземных сооружений следует проектировать с учетом продольных усилий, связанных с боковым давлением грунта и подземных вод на подземное сооружение.

Конструкции подземных сооружений, передающие распор на другие конструкции и/или основание, например сводчатые или купольные перекрытия, следует рассчитывать на проектные ситуации, в которых условия симметрии для восприятия распора не соблюдаются, если запрет таких ситуаций не оговорен проектом.

При строительстве подземного сооружения полузакрытым способом (по схеме "сверху вниз" или "вверх и вниз") его перекрытия следует рассчитывать с учетом прогиба от прогнозируемых неравномерных подъемов или осадок опор при экскавации котлована.