ПНИИИС Госстроя СССР

Рекомендации

по методике прогноза изменения строительных свойств структурно-неустойчивых грунтов при подтоплении



Москва 1984

gost.e-ecolog.ru

Производственный и научно-исследовательский институт
по инженерным изысканиям в строительстве (ПНИИИС)
Госстроя СССР

Рекомендации

по методике прогноза изменения строительных свойств структурно-неустойчивых грунтов при подтоплении

Москва Стройиздат 1984

УДК 624.131.3

Рекомендовано к изданию решением инженерно-геологической секции Научно-технического совета ПНИИИС Госстроя СССР.

Рекомендации по методике прогноза изменения строительных свойств структурно-неустойчивых грунтов при подтоплении/ПНИИИС. – М.: Стройиздат, 1984. – 156 с.

Содержат состав и методику исследований, необходимых для оценки инженерно-геологических свойств структурно-неустойчивых грунтов различных типов и прогноза изменения этих свойств при подтоплении застроенных территорий грунтовыми водами.

Рассмотрены особенности влажностного режима в природной обстановке, закономерности его изменения на освоенных территориях, а также неблагоприятные техногенные последствия в районах, подтопляемых грунтовыми водами. Даны рекомендации по выбору рациональных схем исследований для оценки изменения физико-механических свойств грунтов в условиях подтопления с учетом природы возникающих при этом явлений, видов намечаемого строительства и этапов изысканий.

Приведены методы комплексного изучения строительных свойств структурно-неустойчивых грунтов различного состава, расчетный метод определения параметров консолидации и ползучести с применением ЭВМ, методика экспериментального моделирования и статистической обработки данных.

Для инженерно-технических работников проектно-изыскательских и научно-исследовательских организаций.

Табл. 27, ил. 32.

Р $\frac{3202000000 - 744}{047(01) - 84}$ Инструкт.-нормат., П вып.–90–83

© Стройиздат, 1984

ПРЕДИСЛОВИЕ

В соответствии с требованиями СНиП II-9-78, одной из главных задач инженерных изысканий является разработка прогноза изменения окружающей среды под воздействием строительства и эксплуатации предприятий, зданий и сооружений.

Наиболее актуальной эта проблема является для районов распространения слабопроницаемых грунтов повышенного увлажнения, где строительство, как правило, вызывает прогрессирующий подъем уровня грунтовых вод и подтопление строящихся объектов. Такие условия характерны для интенсивно осваиваемых нефтегазоносных районов Среднего Приобья, где строительство ведется почти повсеместно на потенциально подтопляемых территориях. Широкое развитие в геологическом строении этого района структурно-неустойчивых пород различных литологических типов является причиной активного проявления неблагоприятных инженерно-геологических процессов при обводнении поверхностных горизонтов, резкого снижения несущей способности грунтов и ухудшения их деформационных свойств.

Из-за отсутствия достаточно разработанной методики оценки изменения физико-механических свойств грунтов при их подтоплении в настоящее время проектирование сооружений ведется без должного учета и прогноза этих изменений. Поэтому существует реальная опасность возникновения деформаций зданий и сооружений при подтоплении их оснований грунтовыми водами, что и наблюдается на практике.

Учитывая актуальность и необходимость составления такой методики в Сибирском филиале ПНИИИС исследовалось влияние последствий процесса подтопления на грунты слабой степени литификации.

Объектами исследований служили глинистые и пылеватые грунты с различным содержанием органического вещества элювиально-делювиального, аллювиального, озерно-аллювиального и болотного происхождения, распространенные в нефтегазоносных районах Среднего Приобья.

Выполненные научно-исследовательские работы включали:

1. Изучение особенностей вещественного состава и физико-механических свойств характерных литологических типов грунтов этого района.

2. Организацию и проведение натурных наблюдений и исследований изменения влажностного режима и состояния грунтов в годовом и многолетнем циклах на репрезентативных по природным условиям участках, расположенных на неосвоенных территориях и в пределах городской застройки. Результаты этих исследований позволили оценить диапазон сезонных колебаний влажности в грунтах зоны аэрации, закономерности ее изменения при развитии процессов подтопления и влияние этих изменений на состояние грунтов.

3. Проведение лабораторных экспериментов по моделированию процессов, возникающих в грунтах различного состава при их взаимодействии с грунтовыми водами, и изучение влияния этих процессов на прочностные и деформационные свойства грунтов.

В ходе этих исследований отрабатывалась методика количественного прогноза изменения характеристик физико-механических свойств грунтов при подтоплении территорий грунтовыми водами способом лабораторного моделирования.

В 1982 г. была проведена статистическая обработка материалов прошлых лет, отражающих изменение физико- механических свойств грунтов в различных условиях увлажнения методами многомерного статистического анализа. По результатам этой работы была составлена методика косвенной оценки изменения прочностных и деформационных свойств грунтов в условиях подтопления и получены формулы регрессии, позволяющие прогнозировать эти изменения в поверхностных отложениях изученного региона.

На основе обобщения и анализа результатов этих работ, а также комплекса исследований, включающих изучение консолидационных свойств слабых грунтов, отработку методов количественного прогноза и др., выполненных в 1981–1982 гг., составлены настоящие Рекомендации. В разработке Рекомендаций принимали участие – ст. научн. сотр. И.С. Бочарова (Предисловие, Общие положения, Инженерно-геологические особенности грунтов, Влияние подтопления на физико-механические свойства грунтов, разд. 3, 4, 6); инж. Ю.Н. Воронов (Геологическое строение и гидрогеологические условия, Влажностный режим грунтов и его изменение при застройке территорий); канд. техн. наук Е.С. Дзекцер (разд. 7); канд. геол.-мин. наук Ю.Ф. Захаров (Характеристика причин и факторов подтопления в районе Среднего Приобья), инженеры В.М. Зензина (участие в составлении разд. 2 и 6), В.А. Пырченко (разд. 5 и программа ГРАФИК совместно с И.М. Панюковой); канд. геол.-мин. наук Н.М. Хайме (разд. 5); канд. геол.-мин. наук Я.Е. Шаевич (участие в составлении разд. 2 и 6 в части характеристики свойств и инженерно-геологического изучения лессовых грунтов).

В Рекомендации включена методика интегрального определения параметров одномерной консолидации, разработанная и составленная инж. Калининского Политехнического института Б.В. Сухаревым.

Деформационное поведение грунтов в условиях трехосного сжатия при статических и динамических нагрузках исследованы в ЛИИЖТ кандидатами техн. наук П.Л. Клемационком и И.В. Прокудиным. Ими же составлена методика исследования грунтов в стабилометре.

В полевых, лабораторных и камеральных исследованиях принимали участие инженеры В.М. Зензина, О.П. Штамбург, Б.В. Викулова, В.В. Гаретая, Т.В. Нефедова, Н.Г. Трясорукова, К.Н. Рябичева, Н.Т. Устюгова, Ф.М. Хасанова и сотрудники ЛИИЖТ – инженеры Н.П. Тестова и Л.А. Лаврова.

Научное редактирование осуществлено д-ром геол.-мин. наук проф. Р.С. Зиангировым.

При составлении главы по просадочным грунтам использованы материалы из "Методических рекомендаций по проектированию оснований промышленных зданий, возводимых на просадочных грунтах"/Харьков: Главпромстройпроект Госстроя СССР, 1981.

1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

1.1. При изысканиях на территориях, подверженных подтоплению, к категории структурно-неустойчивых следует относить:

грунты слабой степени уплотнения и литификации, имеющие модуль деформации $E<5{,}0$ МПа (50 кгс/см^2), обычно представленные аллювиальными, озерными, болотными, элювиально-делювиальными и другими генетическими типами пород четвертичного возраста;

грунты, характеризующиеся при естественной влажности высокими показателями физико-механических свойств, но резко снижающие значения прочностных и деформационных характеристик после взаимодействия с грунтовыми водами (лессовые, набухающие глинистые грунты и др.).

1.2. Дополнительное обводнение массивов, сложенных структурно-неустойчивыми грунтами, ведет к существенному изменению их консистенции, вызывает дополнительные осадки или просадки, способствует понижению прочности грунтов, проявлению тиксотропных и плывунных свойств и т.п.

1.3. Интенсивность неблагоприятного последствия процесса подтопления на грунтовые основания, сложенные этими грунтами, зависит от ряда внешних и внутренних факторов, при этом грунтам различного состава свойствен особый, присущий только им характер поведения при взаимодействии с грунтовыми водами. Это является предпосылкой для детального комплексного изучения вещественного состава и свойств грунтов, с учетом их региональных особенностей, при необходимости разработки прогноза поведения грунтовых оснований в условиях подтопления.

1.4. Оценку и прогноз изменения физико-механических свойств грунтов при их взаимодействии с грунтовыми водами рекомендуется осуществлять рационально сочетая расчетный метод прогноза и экспериментальное моделирование.

1.5. Составление прогноза расчетным методом может быть выполнено по результатам статистической обработки данных прошлых лет или материалов, полученных в ходе изысканий, если они содержат данные параллельных определений физико-механических свойств грунтов в разных условиях увлажнения. Этот метод дает приближенную оценку возможных изменений, а его точность зависит от полноты учета факторов (информа-

тивности показателей), определяющих прочность и сжимаемость грунтов, а также их изменение при водонасыщении.

1.6. Экспериментальный метод позволяет количественно оценить возможные изменения физико-механических свойств грунтов при обводнении в условиях, соответствующих их залеганию на строительной площадке. Он основан на моделировании воздействия ожидаемых процессов на грунты с помощью полевых и лабораторных методов исследований.

1.7. Использование для оценки возможных изменений физико-механических свойств грунтов метода инженерно-геологических аналогий ограничено для многих генетических типов отложений сильно выраженной пространственной изменчивостью их состава и свойств. Поэтому имеются большие трудности при выборе природных аналогов исследуемым территориям, а иногда это вообще неосуществимо.

1.8. Материалы, необходимые для оценки и прогноза деформационного поведения грунтов на застроенных территориях после их подтопления, должны быть получены в ходе инженерно-геологических изысканий, путем проведения дополнительного комплекса полевых и лабораторных работ, состав и объем которых устанавливается в программе и согласуется с заказчиком.

1.9. При проведении исследований слабых разновидностей грунтов следует учитывать особенности их структуры и свойств, основными из которых являются малая прочность и деформируемость структурного каркаса, зависимость прочностных и деформационных характеристик от напряженного состояния и режима механических воздействий, существенное изменение этих свойств в процессе консолидации грунтов, медленное развитие осадок во времени, что особенно характерно для слабоуплотненных глинистых, органо-минеральных и органогенных грунтов.

1.10. Основные положения методики прогноза с применением экспериментального метода, распространяются на территории различных регионов, сложенных незасоленными грунтами.

1.11. Представленные в Рекомендациях уравнения регрессии, полученные для прогноза характеристик механических свойств по комплексу классификационных показателей, а также для оценки изменения этих свойств в условиях обводнения, могут быть использованы только для Широтного Приобья и регионов с близкими природными условиями.

2. ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ СРЕДНЕГО ПРИОБЬЯ И ИХ ИЗМЕНЕНИЕ В ХОДЕ ПРОМЫШЛЕННО-ХОЗЯЙСТВЕННОГО ОСВОЕНИЯ

2.1. Нефтегазоносные районы Среднего Приобья расположены в центральной части Западной Сибири и включают частично ее южные районы. Рассматриваемая территория характеризуется резко континентальным климатом, формирование которого происходит под влиянием частой смены арктических воздушных масс, проникающих с севера, и теплых среднеазиатских – с юга. Огромная протяженность региона обусловливает наличие широтной зональности гидрометеорологических условий. Это проявляется в изменении с севера на юг среднегодовых температур от минус 6°С на севере Западной Сибири до минус 0,8°С в районе Томского Приобья, количества осадков – 600–400 мм/год, а также водного и радиационного балансов.

Среднее количество дней в году с осадками равно 200, продолжительность снегового покрова 180–200 дней. Для всего региона характерны короткое лето, непродолжительные переходные периоды с поздними весенними и ранними осенними заморозками, суровая продолжительная зима.

Существенное влияние на климатические условия оказывают геоморфологические особенности, крупные речные долины и пространства, занятые болотами и озерами. Территории с выпуклыми и вогнутыми формами рельефа, склонами разной экспозиции имеют различия в температурном и влажностном режимах, в сроках снеготаяния и интенсивности промерзания.

В северной части рассматриваемого района превышение количества осадков над испаряемостью составляет 400 мм/год, по характеру влагооборота эта территория относится к зоне избыточного увлажнения и низкой теплообеспеченности.

В южной части нефтегазоносных земель болота занимают меньше площади. Соответственно увеличивается и площадь незаболоченных пространств. Геокриологические условия характеризуются отсутствием многолетнемерзлых пород и меньшей глубиной сезонного промерзания, до 1,5–2 м.

ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ И ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ

2.2. Основными геоморфологическими элементами Широтного Приобья являются высокие и низкие поймы речных долин; аллювиальные равнины I, II и III надпойменных террас; озерные, озерно-аллювиальные и водно-ледниковые равнины междуречий, расположенных на различных гипсометрических уровнях.

По факторам рельефообразования в пределах Среднего Приобья выделяются три широтные зоны – северная, центральная и южная, совпадающие в пространстве с зонами ледниковой, приледниковой и внеледниковой аккумуляции. Эти зоны обособляются по географическому положению, строению поверхности отложений, гидрогеологическим условиям и почвенно-растительным ассоциациям.

Северная часть территории является областью распространения ледниковых равнин среднечетвертичного возраста, занимающих пространство междуречий с абсолютными отм. 100–160. Поверхность этих равнин осложнена многочисленными холмами и гривами, понижения между которыми заняты озерно-болотными системами.

Центральная зона включает пониженные и плоские озерно-аллювиальные равнины позднечетвертичного возраста с абсолютными отм. 70–90 и характеризуется широким распространением озерно-болотных комплексов. Интенсивному заболачиванию здесь способствуют переувлажненность и низкая теплообеспеченность поверхностных отложений, исключительная выравненность территории, неглубокие урезы естественных дрен, растянутость паводков, подпирающих грунтовые воды, и преобладание в приповерхностных горизонтах слабофильтрующих глинистых осадков.

Южная зона является центральной частью Западно-Сибирской низменности и представляет собой хорошо разработанную долину р. Оби, врезанную в слабоволнистую приледниковую озерно-аккумулятивную равнину.

Водоразделы р. Оби и ее притоков, являясь частью древней озерно-аллювиальной равнины, слабо расчленены и, в связи с отсутствием поверхностного стока, заболочены. Абсолютные отметки повышаются с севера на юг от 90 до 140–190.

2.3. В долинах р. Оби и ее крупнейших притоков выделяются три надпойменные аккумулятивные террасы и пойма четвертичного возраста, простирающиеся на десятки километров. Поверхность террас характеризуется исключительной выравненностью и слабой естественной дренированностью, что усугубляется длительным половодьем, высоким уровнем паводковых вод и разливами на десятки километров.

Строение речных долин, глубина их вреза, ширина пойм и надпойменных террас закономерно изменяются в меридиональном направлении. С севера на юг возрастают глубина эрозионной расчлененности поверхности, глубина вреза долин, общая площадь дренированных территорий, мощность аэрируемых горизонтов. В северном направлении увеличивается ширина пойменных и надпойменных террас при одновременном снижении их уровней и ухудшении условий естественной дренированности аккумулятивных равнин.

На территории Среднего Приобья наиболее широкое распространение имеют заболоченные аллювиальные равнины III надпойменной террасы, имеющие абсолютные отм. 56–80.

II надпойменная терраса расположена на уровнях с абсолютными отм. 40–60. Поверхность террасы ровная, плоская, сильно заболочена и заозерена. По характеру микрорельефа выделяются болота кочковатые, грядово-озерковые и грядово-мочажинные. Лесные массивы хорошо развиты только вдоль уступов террас. С удалением от бровки склона и ухудшением условий дренированности территорий тайга переходит в угнетенное редколесье, которое постепенно сменяется болотами.

Абсолютные отметки I надпойменной террасы составляют 30–45 м. В морфологическом отношении поверхность террасы ровная, плоская, уступы хорошо выражены и четко отделяют ее от поймы.

Пойменные террасы представлены высокими и низкими уровнями современной речной аккумуляции. Абсолютные отметки закономерно уменьшаются вниз по течению р. Оби над меженным уровнем рек. Поверхность причлененных и островных пойм плоская, осложнена низкими прирусловыми валами и впадинами старичных и вторичных водоемов. Наибольшие пространства пойменных террас среднего и низкого гипсометрических уровней заняты луговыми ландшафтами.

В пределах рассматриваемого региона породы коренной основы, сложенные морскими отложениями палеогена, залегают на большой глубине вне сферы влияния инженерных сооружений. Поверхностные отложения представлены здесь мощной толщей песчано-глинистых осадков четвертичного возраста, среди которых наиболее широкое распространение имеют комплексы аллювиальных, озерно-аллювиальных, озерно-болотных и элювиально-делювиальных отложений. Присущие каждому из комплексов литолого-фациальные горизонты объединяют отложения, образованные в идентичных фациальных обстановках, близкие по химико-минеральному составу и текстурно-структурным особенностям.

Аллювиальный комплекс современных пойм характеризуется закономерной сменой гранулометрических разновидностей в вертикальном разрезе от средне- и мелкозернистых песков с примесью гравия в базальных горизонтах до суглинков, глин и заторфованных пород в приповерхностных слоях, сильно выраженной фациальной изменчивостью отложений и наличием трех основных литолого-фациальных горизонтов руслового, старичного и пойменного аллювия.

Русловые отложения pt слагают нижнюю часть разреза комплекса и представлены кварцево-полевошпатовыми песками, мелкими и пылеватыми, реже средними, с косой и горизонтально-волнистой слоистостью.

Старичные отложения st представлены темно-серыми и сизовато-серыми пылеватыми суглинками и глинами и гумусированными разновидностями этих пород.

Отложения собственно пойменной фации pd обычно венчают разрез современного аллювия и представлены буровато-серыми и коричневато-серыми пылеватыми супесями, суглинками и глинами. Они характеризуются комковатым сложением, ожелезненностью и наличием макропор. Мощность и литологический состав горизонта меняется в поперечном профиле долины от пылеватых песков и супесей в прирусловых зонах до суглинков и глин с линзами заторфованных грунтов в центральных и притеррасовых зонах поймы.

Аллювиальный комплекс I надпойменной террасы $a'III$ характеризуется сложным переслаиванием песков, супесей, суглинков и глин в верхней части разреза, которые сменяются песками в нижних и средних горизонтах. Общая мощность комплекса – 20–25 м.

По строению, текстурно-структурным особенностям, составу и условиям залегания пород в разрезе комплекса выделяются половодно-пойменные песчаные и глинистые отложения, старично-озерные суглинки и глины с прослоями заторфованных пород и русловые мелкие и пылеватые пески. Строение и текстура пород выделенных горизонтов аналогичны описанным для пойменных отложений.

Аллювиальный комплекс II надпойменной террасы a^2III имеет преимущественно двухъярусное строение и представлен в нижней части разреза мощной толщей русловых песков (12–15 м), перекрытых сверху глинистыми породами субаквальных и субаэральных типов общей мощностью 8–10 м. Пески мелкие и пылеватые, кварцево-полевошпатовые с небольшой примесью гидрослюд. Отложения верхнего яруса террасы представлены буровато-серыми пылеватыми супесями и суглинками, облессованными в поверхностных горизонтах.

Озерно-аллювиальные отложения III надпойменной террасы la^3III представлены монотонной толщей тонких пылеватых песков с маломощными прослоями супесей и суглинков, наиболее часто встречающихся в верхних горизонтах разреза. Общая мощность комплекса составляет 20–25 м.

Озерно-аллювиальный комплекс высокой междуречной равнины, известный в литературе под названием ялбыньинской свиты, представлен сложнопостроенной толщей глин, суглинков, супесей и песков, мощность которой в Среднем Приобье составляет 8–26 м. В разрезе комплекса преобладают глинистые пылеватые осадки со сложными типами текстур.

Современный озерно-болотный комплекс hIV имеет покровный характер залегания, развит на всех генетических типах пород долинного комплекса и представлен верховыми, переход-

ными и низинными типами залежей. На отдельных геоморфологических элементах торфяники занимают до 80 % поверхности.

Верховые залежи в исследованном районе имеют наибольшее площадное распространение и мощности до 8–10 м. По ботаническому составу они разделяются на комплексный верховой, сфагново-мочажинный, шейцериевый, пушицевый и сосново-сфагновый. Переходный тип залежей развит по окраинам верховых болот, реже образует самостоятельные массивы и характеризуется относительно небольшой мощностью (2–3 м). По составу выделяются осоково-сфагновые и гипновые виды переходного торфа. Низинные торфяники имеют ограниченное распространение, встречаются в поймах крупных рек района и подразделяются на осоково-гипновые и осоково-сфагновые виды залежей.

Торфяники отличаются высокой обводненностью, степенью разложения 3–39% и небольшой зольностью. Степень разложения увеличивается в верхних горизонтах залежей, что свидетельствует об относительно стабильных геохимическом и гидрогеологическом режимах в основании торфяников.

Покровные отложения в районе Среднего Приобья развиты в активно аэрируемой зоне на всех геоморфологических уровнях, исключая пойму. Они образуют покровы мощностью до 3–5 м и представлены лессовидными суглинками и супесями, которые формируются на породах аллювиального и озерно-аллювиального происхождения.

Геологическое строение южной части нефтегазоносных земель, расположенных в пределах Томской области, характеризуется развитием сплошного покрова аллювиальных и озерно-аллювиальных отложений четвертичной системы, которые со стратиграфическим несогласием перекрывают континентальные осадки палеогена и неогена.

Мощность четвертичных отложений в районе Томского Приобья достигает десятков метров, увеличиваясь в эрозионно-тектонических депрессиях и уменьшаясь в областях локальных поднятий. Верхнюю часть четвертичной толщи слагают лессовые образования. Они распространены повсеместно в пределах правобережья Томи на Томь-Яйском и Томь-Чулымском междуречьях и в правобережье Чулыма. Севернее лессовые отложения прослеживаются до широты верхних течений притоков Чулыма – р. Большая Юкса и р. Кущербак.

В строении покровного комплекса прослеживаются лессовые отложения: верхнечетвертичные Q_3, нерасчлененные средне-верхнечетвертичные Q_{2-3} и среднечетвертичные Q_2. Литологически эта толща характеризуется следующими особенностями:

Верхний лессовый горизонт Q_3. Суглинки, палевые, тяжелые и средние, пылеватые, макропористые с нали-

чием известковистых стяжений и налетов по стенкам пор. Верхняя часть отложений выщелочена до глубины 1,0–3,0 м. Общая мощность в районе Томска 6,0–8,0 до 13,0 м, в северном направлении она падает до 2,5–4,0 м.

Нижний или второй лессовый горизонт Q_{2-3}. Суглинки с четкими серыми тонами окрасок, средние и тяжелые, пылеватые, плотные, слабослоистые, с прослоями и линзами песка, макропористые, карбонатные. Мощность 3,0–5,0–8,0–9,0 м.

Суглинки облессованные в кровле Q_2, серовато-бурые, тяжелые и средние, плотные; глины с прослоями супеси и песка, местами пески. В кровле слабая макропористость. Общая мощность 6,0–8,0 – 20,0–24,0 м в отдельных местах.

К границам литологических горизонтов приурочены погребенные почвы или гумусовые горизонты.

2.4. Гидрогеологический комплекс четвертичных отложений Приобья представлен межпластовыми, грунтовыми водами и верховодкой, включающей болотные и почвенные воды. Водоносные горизонты залегают в осадках различных генетических типов, гидравлически связаны между собой и образуют единую систему подземных вод, дренируемых современной речной сетью.

В районе Широтного Приобья почвенные воды залегают на глубинах 0,3–1,0 м, в зависимости от положения кровли иллювиального горизонта. Они формируются за счет инфильтрации поверхностных вод, существуют сезонно и характеризуются слабой водообильностью. Мощность обводненной зоны не превышает 0,5–0,6 м. Почвенные воды слабоминерализованы (0,1–0,3 г/л), обогащены органическими кислотами (их окисляемость составляет 30–100 мг-экв/л Q_2), имеют кислую и слабокислую реакцию среды (pH 4,5–6,7) и характеризуются повышенным содержанием железа.

Верховодка в пределах поймы и I надпойменной террасы залегает на глубине 0,3–2,2 м. Мощность обводненной зоны составляет 1–2 м, реже 3–4 м. Основным источником ее питания на террасах низкого уровня являются паводковые воды, атмосферные осадки и внутригрунтовая конденсация. Поэтому динамика режима верховодки здесь тесно связана со временем прохождения паводка, количеством атмосферных осадков, динамикой температурного режима, временем и интенсивностью снеготаяния.

На II и III надпойменных террасах верховодка встречается локально на глубинах 0,9–2 м. Она формируется за счет атмосферных осадков, а также благодаря подтоку болотных вод со стороны торфяных массивов. Воды пресные и мало отличаются по составу от основных водоносных горизонтов, нередко ха-

рактеризуются общекислотной, реже углекислой агрессивностью.

Болотные воды залегают на глубинах 0–2 м, насыщая торфяные массивы, и имеют незначительные колебания в годовом цикле – 0,1–0,3 м.

Все торфяные воды содержат много растворенных органических кислот и характеризуются высокой окисляемостью до 96 мг/л O_2. Воды пресные, с величиной общей минерализации до 0,2 г/л, повышенным содержанием железа (до 30 мг/л) и характеризуются общекислотной агрессивностью вследствие высокого содержания фульвокислот и гуминовых кислот.

Постоянно существующие водоносные горизонты четвертичного комплекса представлены грунтовыми водами, которые отличаются относительной выдержанностью и приурочены к песчаным и супесчаным отложениям.

Водоносные горизонты современных аллювиальных отложений имеют повсеместное распространение в поймах рек, приурочены к русловым пескам и представлены преимущественно грунтовыми водами, реже межпластовыми водами, залегающими на глубине 1–7 м. При наличии глинисто-суглинистой покрышки напоры межпластовых вод могут достигать 4–6 м.

Минерализация грунтовых вод, залегающих в разрезе пойм, изменяется в пределах 0,04–0,8 г/л, реакция от кислой до слабощелочной (pH 5,7–7,2). Воды мягкие, общая жесткость не превышает 4–7 мг-экв/л, окисляемость составляет 0,8–13 мг/л O_2, резко уменьшаясь в межпластовых водах, содержание железа 1–3 – 9–16 мг/л, в составе солей преобладают гидрокарбонаты натрия и кальция.

В разрезе верхнечетвертичных отложений надпойменных террас грунтовые воды залегают на глубинах от 10–17 м в приречных дренированных зонах и до 1–2 м в удалении от эрозионных врезов. Колебания их уровней в годовом цикле меняются от 0,2–0,5 м при неглубоком залегании, до 2–4 м в приречных зонах. Литолого-фациальная изменчивость разреза при сложном чередовании проницаемых и слабопроницаемых пород вызывает резкие изменения уровней подземных вод, выклинивание межпластовых вод и формирование локальных куполов и местных напоров.

На участках, характеризующихся распространением островной мерзлоты, формируются подмерзлотные напорные воды, которые встречаются в виде линз в пределах речных трасс под буграми пучения и фиксируются на глубине 6–10 м. Подмерзлотные воды могут проявлять местные напоры до 10–15 м, за счет нагрузки плавающего массива мерзлых пород, слагающих ядра бугров пучения.

Общая минерализация вод верхнечетвертичного комплекса меняется 0,1–0,5–0,7 г/л. По химическому составу воды гидрокарбонатно-натриевые и гидрокарбонатно-кальциевые. Содер-

жание железа в них составляет 5–10 мг/л. Реакция среды от кислой до слабощелочной (pH 5,4–8,1), общая жесткость не превышает 6–13 мг-экв/л. Окисляемость изменяется в диапазоне 36–0,8 мг/л O_2. Грунтовые воды нередко обладают общекислотной, реже углекислой агрессивностью.

В южной части территории верховодка встречается локально в породах покровного комплекса на глубине до 3–5 м. На водоразделах она приурочена к верхнему и нижнему лессовым горизонтам, на надпойменных террасах – к лессовидным суглинкам.

Химический состав воды гидрокарбонатно-кальциево-натриевый, минерализация 296–1857 мг/л, общая жесткость 3,6–26 мг-экв/л, pH 6,5–7,0, агрессивность по отношению к бетону общекислотная и углекислая.

На III надпойменной террасе грунтовые воды залегают на глубинах 2–23 м, воды пресные, гидрокарбонатно-кальциево-магниевые, безнапорные.

На II надпойменной террасе, в связи с отсутствием выдержанного водоупора, грунтовые воды распространены по всему разрезу. Воды пресные, гидрокарбонатно-кальциево-натриевого состава, умеренно жесткие, неагрессивные по отношению к бетону, pH 5,4.

В разрезе I надпойменной террасы горизонт грунтовых вод, приуроченный к песчано-галечниковым отложениям, находится на глубине 8–10 м и имеет гидравлическую связь с уровнем воды р. Оби. Химический состав вод гидрокарбонатно-кальциево-магниевый или гидрокарбонатно-хлоридно-кальциево-магниевый, минерализация 328–1015 мг/л.

Межпластовые воды могут проявлять напор 0,7–5,0 м. Пьезометрическая поверхность воды располагается на уровне 1,5–7 м.

2.5. Уровневый режим подземных вод, низких геоморфологических уровней, гидравлически связан с режимом западносибирских рек, характерной особенностью которого является растянутость половодья, подпирающего грунтовые воды.

Гидрологический режим р. Оби характеризуется наличием трех сезонов: период весенне-летнего половодья, осенний период и зимняя межень. Сроки наступления весеннего половодья и зимней межени связаны с водностью года и зависят от метеорологических условий.

Средние даты начала паводка приходятся на вторую половину апреля, когда существует еще ледовый покров (за 10–12 дней до вскрытия). К моменту прохождения ледохода уровни воды поднимаются на 3–5 м. С середины и до конца мая затапливается пойма, а в июне (15–20 числа) устанавливаются максимальные уровни воды. Спад уровней отмечается с конца июня,

охватывает весь июль и часть августа. Ледостав начинается в конце октября и сохраняется до апреля.

Длительность затопления низких и средних по уровню пойменных террас составляет соответственно 1,5–2,0 мес. В этот же период происходит подтопление грунтов первой террасы в зонах, прилегающих к руслу, в пределах которых наблюдается значительный подъем уровней верховодки и грунтовых вод.

Характерные уровни р. Оби в абсолютных отметках в районах Широтного Приобья приведены в табл. 1.

Таблица 1

Характерные уровни, абсолютные отметки, м	Местоположение	
	г. Нижневартовск	г. Сургут
Высший годовой	39,25	33,42
Высота ледохода	36,52	30,88
Низший годовой	31,98	27,00
Межень	35,0	27,57
Амплитуда колебания относительно межени	4,25	6,42

ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ГРУНТОВ

2.6. Отложения отдельных генетических и литолого-фациальных типов поверхностных отложений Приобья отличаются по вещественному составу и текстурно-структурным особенностям, что обусловлено неодинаковыми условиями осадконакопления и постседиментационного преобразования этих пород в различных фациальных, климатических и ландшафных обстановках.

Влияние зональных факторов проявляется в закономерном изменении с севера на юг интенсивности и направленности процессов физико-химического выветривания, что определяет различия грунтов в северной и южной части рассматриваемой территории по содержанию карбонатов, водно-растворимых солей и составу обменных катионов.

Состав и структура грунтов во многом зависят от современных условий их увлажнения, в связи с чем породы, относящиеся к одинаковым генетическим и фациальным типам, но залегающие в пределах аэрируемых горизонтов и зоны постоянного водонасыщения, могут существенно различаться по структуре и химико-минеральному составу.

2.7. Состав песчаных и пылеватых фракций в поверхностных отложениях Приобья представлен в основном кварцем 56,5–75,5 и полевыми шпатами 23,5–43,0 %; в меньших количествах присутствуют гидратированные зерна биотита и мусковита, хлорит, обломки пород и минералы тяжелой фракции. Среди последних преобладают: рудные минералы, роговая обманка, пироксены, эпидот и др.

Основные различия в составе песчано-пылеватых частиц в средне- и верхнечетвертичных аллювиальных и озерно-аллюви-

альных отложениях проявляются в окатанности минеральных зерен, количественном соотношении породообразующих минералов и составе минералов тяжелой фракции.

Отложения остаточных водоемов, характеризующиеся высоким содержанием органических веществ и образовавшиеся в условиях восстановительной среды, содержат нестойкие по отношению к выветриванию минералы: вивианит, сидерит и др.

2.8. Количество карбонатных минералов закономерно увеличивается с севера на юг. В отложениях пойменных террасс на всем протяжении рассматриваемого района, карбонаты либо отсутствуют совсем, либо представлены немногочисленными обломками раковин.

В верхнечетвертичных отложениях надпойменных террас в районе Широтного Приобья карбонаты содержатся в незначительном количестве, меньше 1 %. В районе устья р. Томь их количество возрастает до 0,8–2,9 %. Максимальные концентрации карбонатных минералов характерны для лессовых грунтов, распространенных в пределах Томской области. Так, в облессованных горизонтах нижнечетвертичных отложений, слагающих водораздел Обь–Томь, количество карбонатов составляет 5–6 %, а в лессовых грунтах, распространенных на юге Томской области, оно может достигать 10–13 % и св. Карбонатные минералы представлены в основном кальцитом, реже сидеритом.

2.9. Состав глинистых минералов на протяжении рассматриваемого района отличается изменчивостью, что обусловлено неодинаковой литологией областей сноса, механической дифференциацией минералов в водоемах, разной направленностью диагенетических и постседиментационных процессов преобразования этих минералов в различных фациальных и ландшафтных обстановках, а также под влиянием почвообразования.

В современных и позднечетвертичных отложениях типичными ассоциациями являются: монтмориллонит, хлорит, гидрослюда (Среднее Приобье); монтмориллонит, гидрослюда и каолинит (Нарымское и Томское Приобье). В составе коллоидно-дисперсных фракций обычно присутствуют тонкодисперсный кварц, органическое вещество и окислы железа.

В породах, затронутых процессами выветривания и почвообразования, наблюдается закономерная смена состава глинистых минералов сверху вниз. В районе Широтного Приобья в верхней части разреза, являющейся зоной циркуляции кислых почвенных вод, преобладающими являются хлорит, иллит и каолинит. С увеличением глубины залегания в составе пород постепенно возрастает содержание монтмориллонита при одновременном изменении pH растворов до щелочных значений, а в горизонтах, не затронутых процессами почвообразования, устойчивой является трехкомпонентная ассоциация, представленная монтмориллонитом, хлоритом и гидрослюдой.

В составе лессового покрова выделяется два горизонта пород, с характерным для каждого из них минеральным составом. В суглинках верхнего горизонта минералы глинистой фракции представлены в основном гидрослюдой. В качестве примесей присутствуют каолинит, бейделлит коллоидно-дисперсный кварц, железистый хлорит, кальцит, полевые шпаты, органические вещества. Неравномерность распределения по горизонту карбоната кальция, а также изменение pH, состава обменных катионов и других химических характеристик позволяет наметить зону выщелачивания с нулевым значением $CaCO_3$ и величиной pH 5,1–6,5 и переходную ко второму горизонту зону с содержанием $CaCO_3$ до 5,2 и соответственно pH до 8,6 %. В составе глинистой фракции суглинков нижнего горизонта преобладают минералы группы гидрослюд. Последние нередко изменены.

2.10. Органическое вещество (ОВ) в грунтах Приобья представлено сложным комплексом соединений, в состав которых входят растительные остатки, продукты их неполного разложения и группа специфических соединений, возникающих в ходе биохимического преобразования последних, представленная гуминовыми и фульвокислотами. Обладая кислотной природой, эти вещества вступают в различные формы связи с минеральной частью грунтов, образуя разнообразные органо-минеральные соединения.

Сравнительно малым содержанием ОВ характеризуются лессовые грунты (0,25–0,70 %).

В русловых и прирусловых песчаных отложениях органическое вещество составляет до 1,5 % и представлено частицами растительного детрита.

Содержание ОВ в отложениях пойменного аллювия не превышает 2–3 %. Исключение составляют осадки заболоченных межгривовых понижений, в которых оно может достигать 5 % и св.

В старично-озерных отложениях содержание органических веществ меняется в пределах от десятых долей процента до 60 % и св. Малые концентрации органического вещества (до 2–3 %) характерны для осадков водоемов, связанных с руслом и отличающихся активным режимом осадконакопления, а также для озерно-аллювиальных отложений позднечетвертичного возраста, слагающих разрезы надпойменных террас. Высоким содержанием ОВ отличаются осадки остаточных зарастающих водоемов, в которых оно может достигать 50 %, а также торфяные отложения.

2.11. Групповой состав ОВ пород аллювиального, озерно-аллювиального и озерно-болотного происхождения характеризуется высоким содержанием фульвокислот (до 57 %) и близким к ним по строению гуминовых кислот (до 29,4 %), что (определяет) сильно выраженные коррозионные свойства органи-

ческих веществ этих грунтов. Гумусовые кислоты, насыщенные Fe^{3+}, Ca^{2+} и Mg^{2+}, способствуют формированию в грунтах водоустойчивых связей. Эти же вещества, насыщенные одновалентными катионами или образующие внутрикомплексные соединения с Fe^{2+}, действуют в грунтах как активные гидрофильные стабилизаторы.

2.12. Грунты Среднего Приобья нередко содержат повышенное количество неокристаллизованных форм гидроокислов железа и алюминия, которые образуются в ходе выветривания и почвообразования при воздействии на породообразующие минералы реакционноспособных органических кислот. Общее содержание R_2O_3 в грунтах составляет 0,82–5,76 %, при этом их наибольшее количество содержится в суглинках пойменного аллювия (3,8–5,7 %). В голубовато-серых старичных суглинках и глинах оно составляет до 1,26 %, в аллювиальных и озерно-аллювиальных грунтах надпойменных террас содержание рассеянных гидроокислов меняется в пределах 0,8–2,03 %. Во всех изученных породах преобладали окислы Al. Количество подвижного железа составляет 0,50–1,70 – в глинистых отложениях поймы и 0,25–0,57 % – в отложениях надпойменных террас. Однако большая часть Fe находится в грунтах в форме локальных скоплений или конкреций, в составе которых его концентрация может достигать высоких значений. В зависимости от окислительно-восстановительных условий соединения железа могут находиться в окисной или закисной форме.

2.13. Все литологические типы грунтов, распространенные в зоне избыточного увлажнения, не засолены. Содержание водорастворимых солей в них представлено сотыми, реже десятыми долями процента, составляя в половодно-пойменных суглинках 0,013–0,084 %, в озерно-старичных отложениях – 0,021–0,253 %, в органо-минеральных озерно-болотных осадках – 0,012–0,340 %. Повышенное количество солей в озерных отложениях связано с поступлением их в водоемы с общим геохимическим стоком и биологической аккумуляцией в самих водоемах.

В составе солей преобладают гидрокарбонаты или сульфаты Na и K, реже Ca и Mg. Среди водно-растворимых веществ в заметных количествах присутствуют органические соединения, кремниевая кислота и ионы железа. В зависимости от содержания водно-растворимых органических кислот значения pH меняются 5,3–7,55.

Повышенное содержание K^+ и Na^+ в составе водно-растворимых компонентов связано с процессами разложения алюмосиликатов и в первую очередь калиевых и натриевых полевых шпатов, активизированными присутствием реакционноспособных органических кислот. Присутствие в продуктах выветривания больших количеств K^+ и Na^+ обусловливает преобладание этих

элементов и в обменном комплексе многих разновидностей грунтов. При кислых значениях pH в составе поглощенных катионов грунтов присутствует Al^{3+}. Торфы и заторфованные разновидности грунтов обычно не насыщены основаниями и содержат обменный H^+.

2.14. Гранулометрический состав поверхностных отложений Приобья характеризуется повышенным содержанием пылеватых частиц и значительной неоднородностью, однако отдельные литолого-фациальные типы грунтов достаточно четко обособляются по характеру дисперсности и соотношению в составе отдельных фракций.

2.15. Гранулометрический состав старичных отложений отчетливо отражает гидродинамический режим водоемов, в которых проходила седиментация осадков, их стадию формирования и различный характер связи с руслом. Наиболее характерными разновидностями этого комплекса являются супеси, реже легкие суглинки, соответствующие стадии затона; средние, тяжелые суглинки и легкие глины с повышенным содержанием тонкопылеватой и глинистой фракции, относящиеся к озерной стадии; тяжелые суглинки, легкие и средние глины вторичных водоемов и стадии отмирания старицы. Содержание глинистых частиц в этих осадках колеблется 20–37, пылеватой – 44–68, песчаных – 6–25 %.

2.16. Глинистые грунты пойменного аллювия отличаются сравнительно высоким содержанием частиц песка и наибольшей разнородностью по соотношению отдельных фракций. По мере удаления от русла, в пределах пойменных террас выделяются три зоны осадконакопления, отличающихся по гранулометрическому составу: прирусловая, центральная и притеррасная.

Преобладающая часть грунтов, формирующихся в прирусловой зоне, классифицируется как пылеватые супеси; в области центральной и притеррасовой поймы, занимающей основную часть поверхности надпойменных террас, доминируют средние и тяжелые суглинки, реже легкие глины.

По результатам статистического анализа глинистые отложения поймы отличаются наибольшей дисперсией показателей отдельных фракций.

2.17. Половодно-пойменные глинистые отложения I надпойменной террасы представлены пылеватыми суглинками и легкими глинами, характерной особенностью которых является пространственная изменчивость гранулометрического состава в пределах литологически обособленных горизонтов и повышенное содержание частиц крупной пыли.

Залегающие в разрезе этой террасы озерные и старичные отложения обычно представлены пылеватыми глинами и тяжелыми суглинками. Содержание глинистой фракции в них составляет 10,05–39,80, пылеватых – 47,12–68,54, песчаных –

9,64–30,08 %. По гранулометрическому составу к ним близки озерно-аллювиальные отложения II надпойменной террасы. Содержание глинистой фракции в этих породах изменяется 20,1–45,5 % (с преобладанием частиц диаметром <0,001 мм; пылеватые фракции, представленные, в основном, частицами крупной пыли, составляют 1,2–21,2 %.

Озерно-аллювиальные комплексы, слагающие равнины, соответствующие третьей и четвертой надпойменным террасам, представлены толщей пылеватых легких глин, суглинков, супесей.

По результатам статистической обработки содержание песчаной фракции в составе глинистых пород Среднего Приобья закономерно уменьшается от более низких террасовых уровней к более высоким. В том же направлении происходит увеличение количества пылеватых и глинистых фракций. Влияние зональных факторов проявляется в постепенном изменении гранулометрического состава аллювиальных отложений в направлении с юга на север. Это выражается в постоянном увеличении в этом направлении содержания глинистых фракций и уменьшении песчаных в отложениях, относящихся к одинаковым литолого-фациальным типам, что связано с характером материала, влекомого водами р. Оби и ее притоков.

2.18. Лессовидные отложения Среднего Приобья обычно представлены пылеватыми тяжелыми, средними, легкими суглинками, реже супесями и характеризуются значительной неоднородностью по содержанию отдельных фракций. Гранулометрический состав облессованных горизонтов имеет определенное сходство с подстилающими их породами, от которых покровные отложения отличаются несколько пониженным содержанием коллоидно-дисперсных фракций. Дисперсный состав лессовидных отложений различного генезиса имеет определенные особенности, отмеченные ниже.

В лессовидных суглинках I и II надпойменных террас содержание пылеватых частиц изменяется в пределах 43–75, песчаных – 6–42 %, при содержании глинистых частиц в среднем до 20 %.

Лессовидные и лессовые отложения III надпойменной террасы отличаются бóльшим содержанием пылеватых (до 80 %) и глинистых фракций (до 32 %), а также постоянным преобладанием частиц крупной пыли (до 40–60 %).

Широко распространенные в районе Томского Приобья аллювиальные лессовые породы представлены незакономерным переслаиванием тяжелых, средних и легких пылеватых суглинков. Делювиальные лессовые породы отличаются достаточной однородностью и характеризуются наибольшим содержанием пылеватых частиц.

2.19. Поверхностные отложения рассматриваемого района в большинстве случаев относятся к молодым слаболитифицированным осадкам, инженерно-геологические свойства которых

определяются их генезисом, фациальной принадлежностью, а также характером и интенсивностью постседиментационных преобразований.

По условиям формирования, особенностям литологического состава, структуры и физико-механических свойств структурно-неустойчивые грунты рассматриваемого района подразделяются на типы, соответствующие основным литолого-фациальным горизонтам названных выше генетических комплексов пород. Они включают:

аллювиальные глинистые отложения половодно-пойменной фации (pd);

озерно-старичные глинистые отложения (stl);

озерно-болотные органо-минеральные отложения (hl);

торфяные отложения современных болот (h);

элювиально-делювиальные лессовидные суглинки и лессы.

Подразделение выделенных литолого-фациальных типов пород на инженерно-геологические виды производится в соответствии с номенклатурными критериями, регламентированными СНиП II-15-74.

Каждый из выделенных типов грунтов отличается разной интенсивностью изменения физико-механических свойств в условиях подтопления и специфическим характером проявляющихся при этом неблагоприятных процессов.

2.20. Глинистые грунты пойменной фации относятся к породам слабой и средней степени уплотнения (ρ_d = 1,0–1,5) и представлены, в большинстве случаев, тяжелыми суглинками и легкими глинами текучепластичной, пластичной, реже тугопластичной консистенции. В природных условиях эти грунты характеризуются контрастными изменениями влажности и окислительно-восстановительной обстановки в годичном цикле – периодической сменой субаквальных, преимущественно восстановительных условий, характерных для периода половодья (весна–лето), и субаэральных условий, свойственных им после спада паводковых вод (осень–зима) (табл. 2).

Глинистые отложения пойменной фации отличаются изменчивостью показателей влажности (W 0,33–0,34), водонасыщенности (S_r 0,8–1,0) и консистенции (I_L 0,5–1,2), что обусловлено их различной уплотненностью и специфическими условиями увлажнения в естественных условиях. Для этих грунтов характерны раздельноагрегатные структуры, с высоким коэффициентом агрегированности частиц диаметром $<$ 0,001 мм (до 8). На формирование их структурных связей оказывают влияние гидроокислы железа, неравномерно распределенные в толще пород и обусловливающие образование в ней локальных участков цементации. В условиях окислительной среды окислы железа и их органо-минеральные производные образуют в осадках мягкие полимеризационные связи, которые, однако,

легко разрушаются в период половодья в условиях восстановительной среды в результате трансформаций окисного железа в подвижную закисную форму. Цементирующая роль железа может проявляться при степени влажности около 0,9, однако прочность и водоустойчивость железо-гумусного цемента возрастает в процессе дегидратации пород.

В водонасыщенном или близком к полному водонасыщению состоянию пылеватые суглинки и глины пойменного аллювия относятся к слабым средне- и сильносжимаемым грунтам, с осредненным значением модуля общей деформации 4,0 МПа (40 кгс/см^2), величиной удельного сцепления 0,018 МПа (0,18 кгс/см^2) и угла внутреннего трения 27°.

Породы, залегающие в зоне аэрации на периодически просыхающих участках, отличаются тугопластичной и полутвердой консистенцией и более высокими показателями деформационных и сдвиговых характеристик: E –19,9 МПа (199 кгс/см^2), C –0,003 МПа (0,33 кгс/см^2), φ –29°.

Параметры механических свойств пойменных суглинков и глин, так же как и их физические показатели, отличаются высокой дисперсией, что связано с неоднородностью их состава и степени водонасыщенности в разные периоды года.

2.21. Глинистые отложения современного старичного аллювия в зависимости от гидродинамического режима водоемов, в которых проходила седиментация осадков, могут быть представлены легкими глинами, тяжелыми и средними суглинками, реже супесями, с повышенным содержанием пылеватых частиц.

При содержании органического вещества < 1,5–2 % в породах формируются стабилизационные или коагуляционные структуры с неводостойкими структурными связями. Условия избыточного увлажнения и наличие легкогидролизуемых органических веществ нередко способствуют развитию в этих осадках глеевых процессов.

В большинстве случаев породы старичного аллювия залегают в зоне постоянного водонасыщения и характеризуются степенью влажности, близкой к 1. Естественная влажность и консистенция этих пород тесно коррелирует с их плотностью и содержанием органического вещества.

Эти грунты сравнительно однородны по составу, характеризуются обычно текучепластичной или мягкопластичной консистенцией, слабой степенью уплотнения и литификации. Естественная влажность меняется в диапазоне: у глин – 0,28–0,40, у суглинков – 0,20–0,35, а значения плотности сухого грунта соответственно составляют 1,15–1,45 и 1,3–1,60. В зависимости от естественной уплотненности среди них встречаются среднесжимаемые и сильносжимаемые разновидности.

Нормативные значения характеристик механических свойств этих грунтов, определенные при статистической обработке дан-

Таблица 2

Геоморфологический элемент	Фация	Название грунта	Гранулометрический состав, %: песок > 0,05	пыль 0,05–0,005	глина < 0,005	Показатели пластичности: верхний предел W_T	нижний предел W_P	число пластичности	Активность глинистой фракции	Влажность естественная, %	Показатель консистенции J_L	Плотность сухого грунта ρ_d	Коэффициент пористости e
Пойма	Пойменная	Супесь	42–61 / 51	30–48 / 40	9–10 / 9,5	21–24 / 22	17–19 / 18	4–6 / 4,5	0,3–0,5 / 0,4	–	0,5–1,1	1,6–1.8	0.65–1,15
		Суглинок	10–68 / 37	24–53 / 43	8–32 / 23	28–37 / 31	17–21 / 19	11–16 / 14	0,2–0,6 / 0,4	28–41 / 32	0,5–1,2	1,2–1,6 / 1,4–0	0,65–1,15 / 0,8
		Глина	7–50 / 22	10–64 / 46	28–46 / 35	40–59 / 45	21–30 / 26	17–28 / 20	0,4–0,7 / 0,55	30–44 / 38	0,5–0,9	1,0–1,45 / 1,25	0,8–1,5 / 1,25
	Старичная	Супесь	18–64 / 44	17–58 / 40	12–20 / 15	23–28 / 25	18–23 / 21	4–6 / 5	0,2–0,4 / 0,3	–	–	–	–
		Суглинок	10–47 / 31	27–53 / 40	25–37 / 29	30–36 / 32	17–20 / 19	11–16 / 13	0,4–0,9 / 0,65	20–35 / 29	0,3–1,0	1,3–1,65 / 1,48	0,6–1,0 / 0,85
		Глина	30–52 / 40	26–40 / 34	22–40 / 28	38–43 / 41	20–22 / 21	17–20 / 18,5	0,5–0,9 / 0,75	28–40 / 34	0,4–0,9	1,15–1,45 / 1,30	0,8–1,2 / 1,0
		Глина	6–20 / 14	55–65 / 58	20–35 / 28	36–54 / 45	22–30 / 25	17–31 / 21	0,6–1,0 / 0,8	29–63 / 50	0,0–1,0	0,8–1,4 / 1,25	0,9–1,95 / 1,15
Терраса	Пойменная	Супесь	21–35 / 28	50–68 / 60	12–15 / 13	21–26 / 24	16–20 / 18	5–6,5 / 5,5	0,3–0,5 / 0,4	20–28 / 21	0,3–0,9	1,47–1,70 / 1,6	0,5–0,8 / 0,7
		Суглинок	7–29 / 17	38–69 / 54	23–40 / 28	25–40 / 33	16–30 / 22	10–16 / 13	0,2–0,6 / 0,45	22–35 / 28	0,0–1,1	1,30–1,7 / 1,5	0,6–0,9 / 0,8
		Глина	8	60	32	38	20	18	0,6	32	0,7	1,4	0,9
	ная	Супесь	21–35 / 27	56–68 / 61	8–15 / 12	21–26 / 24	16–20 / 18	5–6,5 / 5,5	0,3–0,6 / 0,4	20–22 / 21	0,2–0,7	1,4–1,8 / 1,6	0,5–0,15 / 0,6
I надпойменная	Старич	Суглинок	7–30 / 19	38–60 / 48	22–38 / 32	28–34 / 31	16–20 / 18	11–16 / 13	0,3–0,8 / 0,55	22–30 / 27	0,2–0,9	14–16 / 15	0,6–0,9 / 0,7
		Глина	2–18 / 10	38–60 / 53	13–49 / 34	39–55 / 47	30–34 / 32	17–21 / 19	0,5–1,1 / 0,8	20–23 / 21	0,3–0,8	1,31–1,75 / 1,5	0,7–1,1 / 1,0
	Вторичный водоем	Глина	5	64–66	25–29	45–50	26–28	20–22	0,8	34–38	0,3–0,7	1,2–1,35	0,9–1,2
		Суглинок	–	–	–	31–50 / 40	18–31 / 26	9–20	–	–	0,2–1,2	1,1–1,5 / 1,35	–
		Глина	65–80 / 40	50–60 / 56	40–42 / 41	38–50 / 42	21–24 / 23	17–27 / 19	0,4–0,8 / 0,50	28–35 / 32	0,2–0,9	1,2–0,45	0,8–1,1 / 0,86
II надпойменная терраса	Половодно-пойменная	Суглинок	22–65 / 41	24,58 / 39	10–24 / 16	26–35 / 30	17–22 / 19	9–13 / 11	0,1–1,2 / 0,8	18–26 / 22	0,0–0,5	1,4–1,7 / 1,55	0,5–0,9 / 0,77
		Суглинок	9–60 / 26	25–70 / 53	20–30 / 24	24–33 / 30	16–20 / 18	8–13 / 11	0,3–0,6 / 0,45	20–28 / 24	0,3–0,6	1,5–1,7 / 1,6	0,4–0,6 / 0,65
		Супесь	50–90 / 62	9–35 / 25	9–16 / 18	18–25 / 21	15–19 / 16	3–6,5 / 4–5	0,2–0,4 / 0,30	10–20 / 16	0,5–0,8	1,55–1,75 / 1,68	0,5–0,6
		Глина	0,5–20	43–58	35–40	0,25–45	20–25	17–21	0,3–0,6	28–35	0,2–0,6	1,4–1,5	0,75–1
	Озерная	Суглинок	10–40 / 26	28–50 / 47	21–32 / 25	36–44 / 30	18–22 / 20	12–16,5 / 14	0,4–0,8 / 0,6	21–31 / 27	0,2–0,8	1,4–1,6 / 1,5	0,6–0,9 / 0,8
		Глина	5	64–66	25–29	40–50	26–28	21–22	0,7–1,0	34–37	0,3–0,4	1,2–1,35	0,9–1,2
Субаэральные лессовидные породы I и II надпойменных террас		Супесь	4–40 / 20	44–68 / 60	15–29 / 21	22–28 / 25	17–21 / 20	5–7 / 6	0,2–0,4 / 0,3	11–22 / 16	1,3–0,5	1,3–1,5 / 1,4	–
		Суглинок	5–50 / 15	37–65 / 57	13–34 / 27	26–31 / 28	18–21 / 20	7–13 / 9	0,2–0,55 / 0,3	11–26	1,5–0,6	1,3–1,6	–

Примечание. Над чертой – диапазон колебаний значений показателя, под чертой – среднее значение.

ных, составляют: модуль общей деформации 5,0 МПа (50 кгс/см^2), величина удельного сцепления 0,023 МПа (0,23 кгс/см^2); угол внутреннего трения 24°.

2.22. Характерной особенностью органо-минеральных старично-озерных отложений, является высокое содержание гумифицированного органического вещества (> 5 %). Эти грунты отличаются линзовидным залеганием, невыдержанной мощностью, а также изменчивостью состава, структуры и физико-механических свойств по глубине и в плане вследствие неравномерного распределения концентраций органических веществ.

Органо-минеральные грунты Приобья неоднородны по составу обменных катионов, что обусловливает и различия их структурных связей. Грунты, насыщенные Ca^{2+} и Mg^{2+}, характеризуются развитием в объеме осадка коагуляционно-конденсационных структур, обладающих достаточно высокой водопрочностью. Встречаются разновидности, содержащие в обменном комплексе H^+ и Al^{3+}, характеризующиеся, как правило, комковатой структурой.

Результаты статистической обработки данных показывают, что присутствие органических веществ влияет как на средние значения и дисперсии показателей водно-физических и механических свойств грунтов, так и на характер взаимосвязей между ними (рис. 1). У грунтов, залегающих и находящихся на стадии свободного уплотнения, с увеличением содержания органического вещества повышается влажность, пористость, пределы пластичности, существенно увеличивается сжимаемость. При концентрации органического вещества > 15 %, например, влажность может достигать, 250 %, предел текучести – 300 %, плотность сухого грунта – 0,25–0,9 г/см^3. Соответственно низкими являются и показатели механических свойств: модуль деформации не превышает $2 \cdot 10^6$ Па, коэффициент трения 0,15–0,20, величина удельного сцепления $0{,}06 \cdot 10^5$ Па. В районе Среднего Приобья показатели физических свойств органо-минеральных грунтов связаны с концентрацией органического вещества зави-

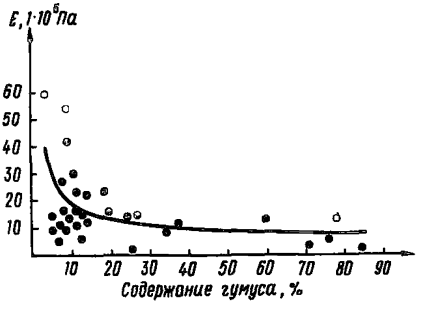


Рис.1. Зависимость модуля деформации E от содержания органического вещества при степени влажности грунтов, близкой к единице ($S_r \approx 1$)

симостями, близкими к линейным. В то же время связи показателей механических свойств с содержанием ОВ нелинейны и чаще всего аппроксимируются гиперболическими функциями.

В области высоких концентраций органических веществ характерен большой разброс характеристик механических свойств, что объясняется различием его группового состава, степени ассоциации макромолекул органических соединений, а также физико-химической природой их взаимодействий с минеральной частью грунтов.

2.23. Аллювиальные и озерно-аллювиальные глинистые грунты надпойменных террас с содержанием органического вещества < 3–5 % мало отличаются по характеристикам физических свойств, в то же время среднеквадратические отклонения влажности и пределов пластичности уменьшаются от низких геоморфологических уровней к высоким. В большинстве случаев суглинки и глины надпойменных террас относятся к сильно- и среднеуплотненным грунтам с плотностью сухого грунта до 1,6 и характеризуются тугопластичной консистенцией, однако среди них встречаются как полутвердые, так и мягкопластичные разновидности (последние обычно залегают на избыточно увлажненных участках или в пластах, контактирующих с водоносными горизонтами).

Коэффициент агрегированности частиц < 0,005 мм закономерно уменьшается от низких геоморфологических уровней к более высоким, где характеризуется значениями, близкими к 1, т.е. соответствует структурам коагуляционного или стабилизационного типов.

В пределах зоны аэрации естественная влажность этих грунтов меняется у суглинков 0,21–0,37, при степени водонасыщенности около 0,85. В зоне постоянного водонасыщения осредненные значения влажности и водонасыщенности соответственно составляют 0,29 и 0,92.

В зависимости от природной уплотненности и степени влажности глинистые грунты надпойменных террас относятся к слабо- или среднесжимаемым разновидностям, но характеризуются сравнительно невысоким сопротивлением сдвигу вследствие слабого сцепления – 0,033 МПа (0,33 кгс/см^2) при величине угла внутреннего трения до 24°.

2.24. Лессовые образования, распространенные в пределах рассматриваемого района, представлены лессовидными суглинками и лессами. Последние широко развиты в составе покровного комплекса в Томской области.

2.25. Лессовидные (покровные) отложения в центральных и северных районах Западной Сибири встречаются на всех геоморфологических уровнях, исключая пойму, и представлены макропористыми суглинками и супесями. Чаще всего они относятся к элювиально-делювиальным образованиям, формирование ко-

торых происходило под влиянием процессов выветривания пород различного генезиса, что обусловливает значительную неоднородность их химико-минерального состава и физико-механических свойств. Мощность лессовидного покрова закономерно увеличивается 0,5–1,5 – 3–5 м по мере перехода от I надпойменной террасы к водоразделам. Увеличение мощности лессовидного покрова для одновозрастных геолого-генетических комплексов отмечается также и в южном направлении, что связано с зональным изменением тепло- и влагообеспеченности региона.

2.26. Лессовидные суглинки характеризуются сравнительно однотипным кварцево-полевошпатовым составом пылеватых фракций. В то же время они различаются по составу глинистых минералов, содержанию карбонатов и водорастворимых солей. Так, минеральный состав глинистых фракций лессовидных пород на севере Тюменской области представлен бейделитизированными гидрослюдами, коалинитом и тонкодисперсным кварцем. В значительных количествах здесь присутствуют гидроокислы железа и алюминия. Карбонаты и водорастворимые соли либо отсутствуют совсем, либо отмечаются в небольших количествах. При продвижении с севера на юг увеличивается содержание водорастворимых солей и карбонатов, в Томской области содержание последних достигает 10–13 %. В составе глинистых фракций преобладающими становятся гидрослюда и монтмориллонит.

Характерной особенностью структуры лессовых грунтов является высокая степень агрегации глинистой фракции в частицы крупной пыли и мелкого песка, что увеличивает их природную пылеватость.

Лессовидные суглинки, распространенные в Тюменской области, относятся преимущественно к породам слабой и средней степени уплотнения. Их естественная влажность и водонасыщенность меняются в значительных пределах в зависимости от особенностей условий залегания, увлажнения и естественной дренированности территорий. Водонасыщенные разновидности этих суглинков относятся к категории слабых сильносжимаемых пород, характеризуются предельно низкими межагрегатными связями и малой прочностью [C – 0,008 МПа (0,08 кг/см^2), [φ–8°], обладают склонностью к ползучести при напряжениях, не превышающих их предел прочности, при нарушении структуры проявляют плывунные свойства.

Вибродинамические нагрузки вызывают разжижение с последующим виброуплотнением грунтов, в процессе которого происходит перераспределение влаги в подверженной вибрации толще грунта и обводнение ее поверхностных горизонтов.

Лессовидные грунты со степенью влажности > 0,7, тугопластичной и полутвердой консистенции, характеризуются высокими показателями механических свойств (E до 15,0 МПа, (150 кгс/см^2), C – 0,045–0,050 МПа (0,45–0,50 кг/см^2), φ до

26°). Однако при взаимодействии с грунтовыми и поверхностными водами эти грунты проявляют просадочные свойства и резко снижают показатели механических свойств.

2.27. В Томской области в строении грунтов покровного комплекса обособливаются по составу и структуре следующие разновидности.

Верхний лессовый горизонт (типичный лесс), представлен палевыми, неслоистыми маркопористыми пылеватыми суглинками с наличием известковистых стяжений и налетов карбонатов по стенкам пор. На некоторых повышенно увлажненных территориях верхняя часть толщи до глубины 1–3 м может быть выщелочена, образуя деградированный горизонт.

Нижний лессовый горизонт, представленный серовато-палевыми тяжелыми пылеватыми суглинками, отличается повышенной плотностью и карбонатностью.

Лессовидные суглинки средние и тяжелые слабомакропористые.

Влажность и водонасыщенность лессовых отложений южной части рассматриваемого района меняются в широких пределах (W – 0,07–0,37; S_r – 0,25–0,9) и зависят от глубины залегания водоносных горизонтов и условий поверхностного увлажнения.

Значения физических характеристик лессовых грунтов этого района изменяются в соответствии с их условиями формирования и структурными особенностями. Просадочными свойствами обладают только типичные лессы и лессовидные грунты с высокой пористостью (e – 0,80–0,85) при степени влажности $< 0,8$.

Глубина распространения просадочных разностей не превышает 5 м. С учетом деградированной зоны общая мощность просадочных пород оказывается весьма незначительной. Лессовидные грунты террас, так же как и породы верхнего горизонта, не являются типичными просадочными породами, просадочных деформаций при бытовых нагрузках они не обнаруживают.

Дополнительные осадки в них наблюдаются только при замачивании под нагрузками преимущественно 0,2 МПа и св. (2 кг/см^2). Максимальные значения коэффициента относительной просадочности при нагрузке 0,1 МПа (1,0 кгс/см^2) – 0,00–0,02, при 0,2 МПа (2,0 кгс/см^2) – 0,018–0,075, при 0,25–0,30 МПа (2,5–3,0 кгс/см^2) – 0,02–0,09. Характерна связь проявления просадочных свойств с влажностным режимом этих грунтов, в связи с чем для достоверной оценки просадочности необходим учет сезонных изменений их влажности.

Наименьшими показателями прочностных свойств характеризуются типично лессовые грунты. Удельное сцепление и угол внутреннего трения их соответственно составляют C–0,017 МПа (0,17 кгс/см^2), φ – 19°.

Деградированные лессовые горизонты и лессовидные суглинки характеризуются сцеплением до 0,015 МПа (0,15 кгс/см^2) и величиной угла внутреннего трения 19–22°.

ВЛАЖНОСТНЫЙ РЕЖИМ ГРУНТОВ И ЕГО ИЗМЕНЕНИЕ ПРИ ЗАСТРОЙКЕ ТЕРРИТОРИЙ

2.28. Характеристики физико-механических свойств грунтов рассматриваемого района могут существенно меняться в зависимости от динамики влажностного режима поверхностных отложений в годовом цикле. Изменение влажности в грунтах на незастроенных участках обусловлено совокупностью природных факторов, основными из которых являются гидрометеорологические, гидрогеологические, геокриологические условия, а также геологическое строение и состав поверхностных отложений.

2.29. В пределах однотипных геоморфологических элементов диапазон сезонных изменений влажности грунтов зависит от условий дренированности отдельных участков. На слабодренированных территориях аллювиальных и озерно-аллювиальных равнин с высоким уровнем грунтовых вод режим водоносных горизонтов и влажностный режим грунтов характеризуется однообразием на больших площадях. Колебания УГВ не превыша-

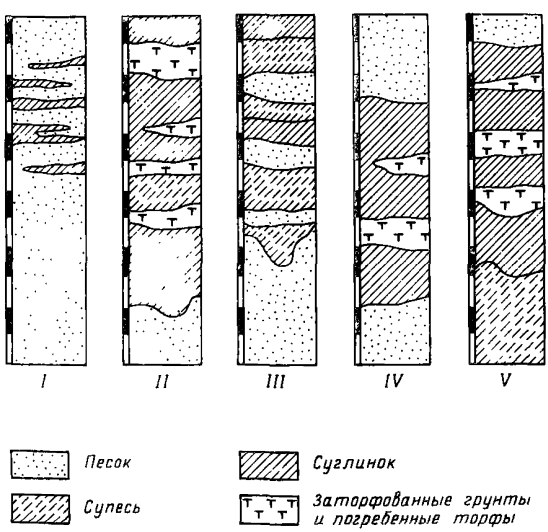


Рис.2. Типичные разрезы аллювиальных и озерно-аллювиальных отложений Широтного Приобья *(I–V)*

ют здесь 0,3–0,5 м, а поверхностные отложения находятся преимущественно в водонасыщенном состоянии.

2.30. На дренированных территориях уровенный режим подземных вод и динамика влажностного режима грунтов характеризуются сезонной изменчивостью, при этом мощность зоны аэрации, эпюры распределения влажности в разрезе и диапазон ее колебаний в годичном цикле зависят от условий увлажнения и геолого-литологического строения отдельных участков.

2.31. Для районов Широтного Приобья характерны типы разрезов, представленные на рис.2:

преимущественно песчаные с маломощными прослоями супесчано-суглинистых пород в верхних горизонтах разреза (I тип);

глинистые с прослоями заторфованных пород, мощностью св. 8–10 м, подстилаемые песками (II тип);

сложное чередование в верхней части разреза песчано-супесчаных (III тип), либо супесчано-суглинистых (IУ тип), подстилаемых песками;

преимущественно трехслойные разрезы с мощным горизонтом или линзами глинистых и заторфованных пород (до 10–12 м), перекрытых и подстилаемых песчаными или песчано-супесчаными породами (У тип).

В строении первой надпойменной террасы р. Оби преобладают разрезы I и III типов. Уровни грунтовых вод меняются здесь 4–5 – 7–9 м, по мере приближения к естественным дренам глубина их увеличивается до 10 м. Амплитуда годовых колебаний их уровней составляет 1–3 м и имеет тесную связь с гидрологическим режимом р. Оби и ее притоков.

Для II надпойменной террасы характерно почти повсеместное развитие разрезов II типа, исключая лишь отдельные участки, сложенные сверху песчано-супесчаными осадками. Уровни грунтовых вод залегают на глубинах св. 10–12 м, достигая 17–19 м и в зонах, прилегающих к уступам террасс. Положение УГВ контролируется глубиной залегания верхней суглинисто-глинистой пачки.

Для III надпойменной террасы наиболее характерны У и реже III типы разрезов. Грунтовые воды залегают здесь на глубинах 15–20 м. Водовмещающими являются пески и супеси, подстилающие средний глинистый горизонт разреза.

2.32. В разрезах I, III и IУ типов на небольших глубинах отмечается локальная сезонно существующая верховодка. Избыточное увлажнение создается при наличии в песках глинистых и суглинистых прослоек, играющих роль водоупоров. Условия водообмена связаны с атмосферным или грунтово-атмосферным питанием.

В разрезах II типа развиты почвенные воды и локальная верховодка. Условия водообмена характеризуются разобщенным атмосферным и грунтовым питанием. При высоком положении

УГВ (I терраса р. Оби) поверхностные горизонты находятся в зоне капиллярного насыщения, а их влажность близка к полной влагоемкости.

Для разрезов II типа в условиях естественного водообмена характерен достаточно стабильный влажностный режим, при этом имеется тенденция либо к слабому обводнению, либо к осушению. Прогрессирующее обводнение грунтовой толщи может происходить в результате бокового притока влаги, внутригрунтовой конденсации или подъема капиллярной каймы в случае повышения УГВ. Уменьшение влажности в грунтах обычно связано с внутригрунтовым испарением, транспирацией и гравитационным перемещением влаги вглубь по разрезу.

Для разрезов У типа характерно присутствие двух водоносных горизонтов: первого – почвенных вод и верховодки, существующих непостоянно; второго – грунтовых вод, залегающих на большой глубине.

2.33. В пределах поймы, I надпойменной террасы и сниженных участков II террасы формирование влажностного режима имеет тесную связь с динамикой грунтовых и болотных вод, условиями прохождения паводков и гидрологическим режимом рек и межень, а также гидрометеорологическими условиями. В связи с высоким положением УГВ и верховодки, распространенные здесь грунты характеризуются небольшой мощностью зоны аэрации (3–4 м и 7 м вблизи естественных дрен), высокими значениями влажности и степени водонасыщенности ($> 0{,}8$), а также сравнительно малым диапазоном изменения влагосодержания в грунтах в годовом цикле. Обширные территории, расположенные в пойме и в пределах первой надпойменной террасы, следует рассматривать как постоянно подтопленные или испытывающие сезонное весенне-летне-осеннее подтопление.

В пределах аллювиальных и озерно-аллювиальных равнин II и III надпойменных равнин и междуречий формирование влажностного режима поверхностных отложений не связано с динамикой глубоко залегающих грунтовых вод. Главными факторами, определяющими сезонные изменения влажности, здесь являются гидрометеорологические условия, геолого-литологическое строение разрезов, положение отдельных участков относительно естественных дрен и влияние болотных вод.

Мощность зоны аэрации и годовых колебаний влажности составляет здесь в среднем 5–6 м, увеличиваясь вблизи естественных дрен до 10 м. Амплитуды изменения влажности грунтов в зоне аэрации для суглинков, супесей и песков составляют соответственно 0,12–0,15, 0,06–0,10, 0,02–0,05. В переходные периоды года в верхних горизонтах территорий с разрезами I, III и IУ типов формируются сезонно существующие купола верховодки, обусловливающей локальное обводнение грунтов.

2.34. Изменения условий увлажнения и влажностного режима поверхностных отложений хорошо фиксируются на местности с помощью ландшафтно-индикационного метода. Для условий хорошей, средней и плохой дренированности с разным геолого-литологическим строением характерны определенные почвенно-растительные ассоциации, которые могут быть выявлены при дешифрировании аэрофотоснимков.

2.35. В ходе промышленно-хозяйственного освоения нефтегазоносных районов Среднего Приобья происходит нарушение природного водного баланса в поверхностных отложениях, что ведет к изменению уровня и режима грунтовых вод, созданию новых водоносных горизонтов и интенсивному развитию процессов подтопления застраиваемых территорий.

2.36. К естественным факторам подтопления относятся:

расположение рассматриваемого района в зоне избыточного увлажнения и недостаточной теплообеспеченности;

низкая дренированность территории и плохие условия поверхностного стока вследствие выравненности аллювиальных и озерно-аллювиальных равнин и чрезвычайно слабых уклонов местности;

наличие в верхних горизонтах прослоев и линз глинистых и гумусированных грунтов, играющих роль водоупоров;

гидрологический режим сибирских рек, характерной особенностью которого является растянутость паводка до конца лета, обусловливающая подпор грунтовых вод.

Искусственными факторами прогрессирующего обводнения грунтов застроенных территорий Тюменского и Томского Приобья являются следующие:

формирование подпора грунтовых вод вследствие создания на пути естественного подземного стока водонепроницаемых экранов из мерзлых пород, возникающих под трассами дорог, траншеями, полями гидронамыва и т.п. и сохраняющихся обычно в течение всего теплого периода года;

формирование дополнительных источников питания грунтовых вод вследствие создания на пути естественного поверхностного стока различных насыпей из плохо фильтрующих, уплотненных или мерзлых грунтов, т.е. нарушение условий поверхностного стока;

уплотнение грунтов под действием нагрузки от зданий и сооружений или при устройстве свайного ростверка, что создает дополнительный подпор грунтовых вод (подземный барраж);

обвалование и устройство дамб в целях борьбы с подтоплением приречных земель паводковыми водами и создание временного подпора (в период весеннего паводка) грунтовых вод;

накопление в котловинах и траншеях стока атмосферных осадков и разрыхление (подсыпка) поверхностных слоев при инженерной подготовке территории и строительстве, увеличи-

вающие инфильтрацию атмосферных осадков, талых и поливных вод, и значительные утечки из водонесущих коммуникаций;

застройка территории и устройство различных покрытий, приводящие к сокращению поверхности испарения;

изменение температурного режима грунтов оснований зданий и сооружений и вызванное им усиление внутригрунтовой конденсации, антропогенное оттаивание сезонно-мерзлых пород, образование чаш просачивания;

увеличение при строительном освоении территории длительности существования сезонно-мерзлого слоя, вызывающие повышение влажности подстилающих этот слой грунтов вследствие усиления внутригрунтовой конденсации;

общее оседание поверхности земли под нефтяными, газовыми промыслами и крупными водозаборами, приводящее к некоторому повышению уровня грунтовых вод, и создание условий, способствующих накоплению воды в регионе;

длительное существование открытых строительных котлованов, траншей, превращающихся в аккумуляторы поверхностных вод и способствующих переводу их в подземные;

длительный гидронамыв тонкодисперсных грунтов с неудовлетворительным водоотводом.

2.37. Подавляющее большинство перечисленных выше причин антропогенных изменений водного режима приводит к устойчивому обводнению грунтов, являющихся геологической средой и естественными основаниями всех видов зданий и сооружений, возводимых в Западной Сибири. Как правило, такое обводнение начинается с локального увеличения влажности и подтопления отдельных объектов и участков верховодкой, а заканчивается интенсивным подъемом уровня грунтовых вод, вплоть до заболачивания обширных территорий. Главными факторами, способствующими интенсивному развитию процессов заболачивания на застраиваемых территориях, являются равнинный рельеф, низкая водопроницаемость грунтов, слабая дренированность территорий, длительное сезонное промерзание грунтов.

2.38. На освоенных территориях нередко наблюдаются неблагоприятные изменения химического состава поверхностных и грунтовых вод. Наиболее ощутимые изменения происходят в нефтедобывающих районах за счет постоянных утечек минерализованных сеноманских (используемых для поддержания пластовых давлений), попутных и подтоварных вод (добываемых вместе с нефтью и отделяющихся при ее термохимической подготовке и в резервуарах-накопителях). Большие объемы аналогичных подземных вод выносятся на поверхность вместе с добываемым газом и, после их разделения, поступают в поверхностные и подземные воды. В городах и поселках основными источниками загрязнения являются утечки промышленных и бытовых стоков.

2.39. В связи с особенностями тепло- и влагообеспеченности региона и геолого-литологического строения поверхностных отложений значительные площади в пределах освоенных территорий могут подвергаться сезонному подтоплению, обусловленному временным развитием верховодки.

Для застроенных территорий I подтопленной террасы р. Оби наиболее характерно весенне-летнее подтопление. Оно связано с образованием верховодки, выдержанной и локальной, на участках, характеризующихся разрезами I, III и IУ типов, с наличием на небольшой глубине слабопроницаемых прослоек и линз, глинистых и заторфованных грунтов, а также элювиальных почвенных грунтов.

Верховодка образуется вследствие временного скопления воды при оттаивании сезонно-мерзлого слоя, скопления инфильтрующихся вод при снеготаянии и в периоды с повышенным количеством атмосферных осадков, а также подтока вод со стороны рек, из торфяных массивов. Подъем уровня верховодки на I подтопляемой террасе начинается в апреле–мае, достигает максимума в конце мая, иногда в июне и сохраняется с небольшими колебаниями на протяжении всего лета. Спад начинается с сентября и усиливается с наступлением морозов. В октябре отмечается, как правило, небольшой подъем, вызванный увеличением атмосферных осадков.

Поверхностные отложения террас высокого уровня и междуречий наиболее подвержены весенне-летне-осеннему подтоплению. Питание верховодки здесь связано с инфильтрацией атмосферных осадков и влиянием обводнения со стороны болот. В пределах II и III надпойменных террас начало подъема уровня верховодки соответствует периоду снеготаяния и протаивания сезонно-мерзлых пород; максимальное его положение наблюдается в июне-июле. Нередко в сентябре отмечается второй максимум, совпадающий по амплитуде с первым, который соответствует периоду выпадения наибольшего количества осадков. Верховодка в многоводные годы существует постоянно; в маловодные годы появляется только в весенне-летний период.

Характеристика химического состава подземных вод Широтного Приобья и особенности их влияния на грунты отражены в табл. 3.

Таблица 3

Тип подземных вод	Характер водовмещающей среды	Глубина залегания от поверхности, м	Средняя мощность, м	Наличие напора	Источник питания	Минерализация, г/л
Болотные и почвенные	Торф, луговые и болотные почвы, суглинки	0–1,2	0,7–1,5	В зимний период	Атмосферные, поверхностные воды	0,2–0,3
Верховодка	Песок с раздельными слоями (суглинки, глины)	0,5–5	1,2	Безнапорные	Атмосферные осадки, воды талого слоя	0,1–0,2
Межпластовые грунтовые	Пески, зажатые пачками суглинков и супесей	15–60	5–30	Напор 5–10 м	То же	0,1–0,5
Грунтовые	Пески, супеси	3–50	10–30	Безнапорные	Атмосферные, артезианские и поверхностные воды, хозяйственные стоки, конденсасация	0,1–0,5
Линзы подмерзлотных вод	Посткриогенные образования в песках и суглинках	6–10	2–5	Напор	Атмосферные и грунтовые воды	—
Артезианские	Пески и песчаники в отложениях	50–250	20–30	Напор до 10 м и св.	Переток из горизонтов грунтовых вод, инфильтрация речных вод	0,3–1,0 и св.

Преобладают элементы химического состава	Влияние на инженерные свойства	Примеры	Рекомендуемые меры борьбы при избытке влагозапасов	Примечание
HCO_3^-, кислоты органические, Fe^{2+}, Fe^{3+}, H^+	Создают избыточное увлажнение	Участки месторождения Самотлор, Федоровского, восточная часть Нижневартовска, северная часть Сургута	Выторфовочный метод строительства, создание сети осушительных каналов	Режим изменчив, определяется гидрологометеорологическими факторами
Плохо изучены	Являются причиной подтопления и заболачивания грунтов	Участки в пределах I и II надпойменных террас (изучены на территориях Сургута и Нижневартовска)	Локальный открытый дренаж	Часто имеет сезонный характер. Может возникать на слое длительно-сезонного промерзания
То же	Локальное влияние на участках разгрузки	Самотлор, г. Нижневартовск	Не требуется	Режим изучен слабо
HCO_3^-, Cl^-, реже SO_4^{2-}, Na^+, реже Ca^{2+}	В паводковый период подтопление и переувлажнение	г. Сургут, Холмогорское месторождение	Искусственное понижение уровня	Горизонты выдержаны на участках II и III надпойменных террас. В случае песчаного разреза режим наиболее изменчив в приречных зонах
–	–	Бугры пучения речных террас	–	Режим не изучен, связан с температурным режимом грунтов
Разнообразные	–	Имеют региональное распространение	Не требуются	Режим устойчив, исключая области питания

ВЛИЯНИЕ ПОДТОПЛЕНИЯ НА ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ГРУНТОВ

2.40. Процессы, возникающие на подтопленных территориях, расположенных в пределах нефтегазоносных районов Среднего Приобья, носят выраженный зональный характер, что обусловлено различиями состава и состояния поверхностных отложений в разных климатических зонах.

2.41. Для зоны "избыточного увлажнения" (Широтное Приобье) характерно существенное уменьшение прочности грунтов, снижение устойчивости к воздействию вибродинамических нагрузок, проявление тиксотропных свойств и плывунности. Вследствие малой водоустойчивости межчастичных и межагрегатных связей в пылеватых грунтах, дополнительное обводнение вызывает оплывание стенок котлованов и является обычной причиной потери устойчивости земляного полотна дорог и других насыпных сооружений.

2.42. В зоне "достаточного увлажнения", характеризующейся широким распространением лессовых грунтов, подтопление, кроме названных процессов, вызывает развитие просадочных и послепросадочных деформаций оснований, сложенных этими грунтами, и обусловливает набухание глинистых грунтов тугопластичной и полутвердой консистенции.

2.43. Основными факторами, определяющими интенсивность изменения свойств грунтов застроенных территорий являются:

низкая связность грунтов вследствие высокого содержания пылеватых фракций и мелкого песка агрегированного состояния частиц $< 0{,}001$ мм, а также слабые межагрегатные связи;

высокая гидрофильность содержащихся в грунтах коллоидно-дисперсных составляющих, представленных преимущественно минералами группы монтмориллонита и реакционноспособными органическими соединениями (фульвокислотами и близкими к ним по строению гуминовыми кислотами);

состав обменного комплекса пород, специфической особенностью которого является повышенное содержание одновалентных катионов (Na^+ и K^+) и присутствие в составе поровых вод гидрокарбонатов и сульфатов щелочей, действующих при низкой концентрации как активные гидрофильные стабилизаторы;

разрушение в условиях избыточного увлажнения цементационных связей, образованных окислами железа, и размягчение карбонатного цемента в лессах и лессовидных грунтах;

малая минерализация и преимущественно гидрокарбонатно-натриевый и сульфатнонатриевый состав грунтовых вод. (Присутствие в верхних водоносных горизонтах Среднего Приобья $NaHCO_3$ и Na_2SO_4 при их низкой концентрации увеличивает эффект снижения прочности грунтов даже при небольшом увеличении степени водонасыщенности, например 0,85–1.)

2.44. Влияние обводнения на структуру грунтов различного состава особенно отчетливо проявляется при изучении их размокания.

Наименьшей водоустойчивостью обладают раздельноагрегатные структуры грунтов, залегающих в аэрируемых и сезонно промерзающих горизонтах и представленных лессовидными и половодно-пойменными суглинками и супесями. Помещенные в воду образцы этих пород размокают в течение нескольких секунд.

Характеризующиеся повышенным содержанием Fe суглинки и глины пойменного аллювия размокают за 5—12 ч. Изменение окраски образцов от бурой до голубовато-серой свидетельствует о восстановлении содержащихся в них соединений окисного железа во время их нахождения под водой.

Пылеватые суглинки и глины с водно-коллоидными структурными связями, слагающие разрезы надпойменных террас, размокают от 2—3 мин до нескольких часов. Обычно скорость размокания возрастает с увеличением содержания пылеватых фракций, степени агрегированности глинистых частиц и уменьшением влажности грунтов.

Значительной водоустойчивостью отличаются грунты, содержащие $>$ 3—5 % органического вещества, что обусловлено наличием в их структурах водородных и различной природы химических связей, образованных при взаимодействии реакционноспособных групп гумусовых соединений. Помещенные в воду образцы этих пород не размокают совсем.

2.45. В районе Широтного Приобья при отсутствии набухания или его малой величине (до 0,02) дополнительное водонасыщение нередко вызывает снижение деформационных характеристик грунтов. При этом степень изменения их сжимаемости после подтопления зависит от влажности и водонасыщенности грунтов до развития этого процесса, а также от их плотности, дисперсности, водоустойчивости структурных связей и способности набухать (рис. 3—10).

Наиболее существенное снижение деформационных характеристик наблюдается после взаимодействия с грунтовыми водами не полностью водонасыщенных лессовидных суглинков. Эти грунты со степенью влажности $<$ 0,8 проявляют просадочные свойства, при этом величина относительной просадочности возрастает пропорционально пористости грунтов и действующему давлению.

После водонасыщения консистенция покровных суглинков может меняться от полутвердой и тугопластичной до текучепластичной или текучей.

Существенное снижение характеристик сжимаемости при обводнении наблюдается у озерно-аллювиальных глинистых грунтов, слагающих аэрируемые горизонты надпойменных террас с со степенью влажности до 0,93. Однако при замачивании образ-

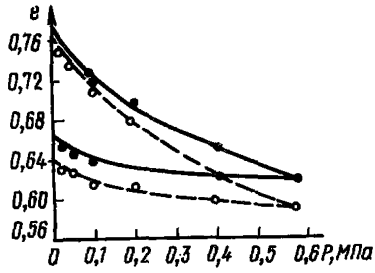


Рис.3. Изменение сжимаемости после взаимодействия с водой. Суглинок озерно-аллювиальный ——— – испытание образца с естественной влажностью; – – – – испытание образца, предварительно водонасыщенного

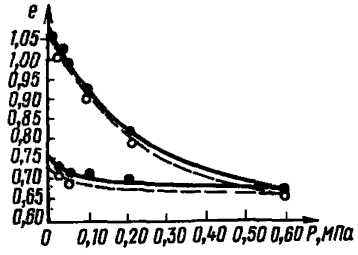


Рис.4. Изменение сжимаемости после взаимодействия с водой. Суглинок озерно-аллювиальный ——— – испытание образца с естественной влажностью; – – – испытание образца, предварительно водонасыщенного

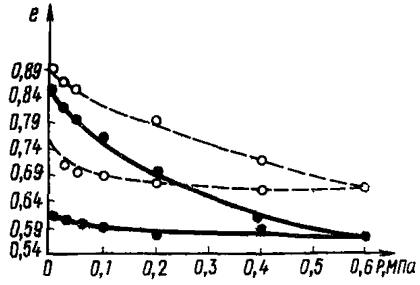


Рис.5. Изменение сжимаемости при взаимодействии с водой. Суглинок пойменного аллювия ——— – испытание образца с естественной влажностью; – – – – испытание предварительно водонасыщенного образца

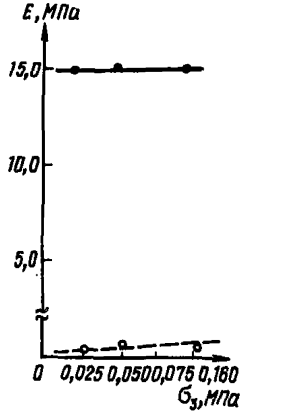


Рис.6. Изменение модуля деформации в зависимости от σ_3 по данным трехосных испытаний. Суглинок лессовидный ——— – испытание образца с естественной влажностью; – – – – испытание образца, предварительно водонасыщенного

цов этих грунтов после их уплотнения до полной консолидации под нагрузками 0,15–0,20 МПа (1,5–2,0 кгс/см^2) дополнительные деформации не возникают; те же грунты в состоянии незавершенной консолидации часто снижают показатели сжимаемости после дополнительного обводнения (рис. 3).

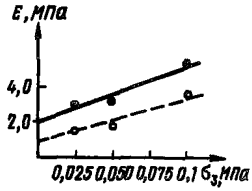


Рис.7. Изменение модуля деформации E в зависимости от $\sigma_з$ по данным трехосных испытаний. Суглинок озерно-аллювиальный
——— – испытание образца с естественной влажностью; – – – – испытание образца, предварительно водонасыщенного

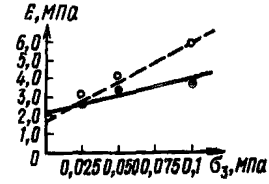


Рис.8. Изменение модуля деформации в зависимости от $\sigma_з$ по данным трехосных испытаний. Суглинок пойменного аллювия
——— – испытание образца с естественной влажностью; – – – – испытание образца, предварительно водонасыщенного

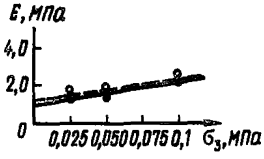


Рис.9. Изменение модуля деформации в зависимости от $\sigma_з$ по данным трехосных испытаний. Суглинок аллювиальный
——— – испытание образца с естественной влажностью; – – – – испытание образца, предварительно водонасыщенного

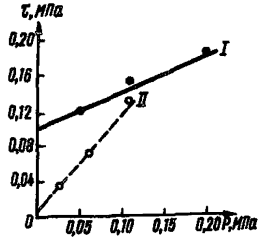


Рис.10. Влияние водонасыщения на сопротивление сдвигу по результатам неконсолидированных испытаний.
1 – испытание образца с естественной влажностью, 2 – испытание образца, предварительно водонасыщенного

Значения деформационных характеристик при взаимодействии с грунтовыми водами у водонасыщенных разновидностей грунтов Широтного Приобья ($S_r \approx 1$) практически не меняются даже при замачивании сильноуплотненных пород с плотностью сухого грунта 1,65–1,70 (см. рис. 4, 9).

Аномальное поведение при уплотнении в условиях замачивания обнаруживают грунты, в которых избыточное увлажнение вызывает развитие процесса оглеения. Происходящее при этом повышение степени дисперсности грунтов и резкое ухудшение их фильтрационных свойств и обусловливают уменьшение сжимаемости грунтов при прочих равных условиях (см. рис. 5, 8), табл. 4.

Литологический тип грунта	Влажность естественная w, %	Плотность сухого грунта ρ_d	Коэффициент пористости e	Степень влажности S_r	Изменение сжимаемости после взаимодействия с водой: Е в интервале давлений 0–0,1, МПа	
					при естественной влажности	после водонасыщения
Суглинок лессовидный $ed\ III-II$	23	1,25	1,160	0,54	1,7	0,5
Суглинок лессовидный $ed\ III-II$	19	1,35	1,008	0,52	4,2	3,1
Суглинок лессовидный $ed\ III-II$	13	1,37	0,865	0,32	7,8	1,6
Суглинок тяжелый $ta^3\ III$	14	1,51	0,798	0,48	12,8	2,8
Глина пылеватая $ta^2\ III$	20	1,49	0,826	0,66	7,6	5,5
Суглинок средний пылеватый $a^1\ III$	20	1,68	0,595	0,97	11,3	8,4
Глина пылеватая $ta\ IV$	22	1,49	0,826	0,66	7,6	5,5
Суглинок тяжелый $a\ IV$	32	1,21	1,242	0,70	1,1	1,1
Суглинок гумусированный $a\ IV$	36	1,27	3,219	0,96	1,5	1,5
Суглинок тяжелый пылеватый $a\ IV$	19	1,72	0,564	0,91	6,8	17,3
Суглинок тяжелый пылеватый $a\ IV$	18	1,79	0,486	0,99	5,9	5,9

Примечание. Показатели сжимаемости грунтов получены при компрессионных испытаниях.

2.46. Глинистые грунты, слагающие естественно дренированные поверхности надпойменных террас и междуречий в Томской области, проявляют способность к набуханию и характеризуются величиной относительного набухания до 0,21. Среди набухающих грунтов этого района широко распространены разновидности, сцементированные карбонатами и окислами железа. Поэтому у большинства пород способность к набуханию существенно возрастает после нарушения естественного сложения.

Таблица 4

Изменение сжимаемости после взаимодействия с водой: Е в интервале давлений 0,1–0,2 МПа		$K^E_{п.вод.} = \frac{E_{ест.}}{E_{водон.}}$ в интервале давлений		Изменение сопротивления грунтов сдвигу после взаимодействия с водой: C, МПа		$K^C_{п.вод} = \frac{C_{ест}}{C_{вод.}}$	φ^o	
при естественной влажности	после водонасыщения	0–0,1, МПа	0,1–0,2, МПа	при естественной влажности	после водонасыщения		при естественной влажности	после водонасыщения
1,6	2,4	3,4	0,6	0,012	0,000	–	22	27
3,1	2,9	1,3	1,3	0,016	0,003	5,3	21	15
5,0	3,9	4,8	1,2	0,022	0,005	4,4	22	26
3,0	3,1	4,5		0,015	0,005	3,0	31	14
14,2	6,6	1,4	2,2	0,020	0,077	–	26	22
11,9	20,0	1,3	0,5	0,030	0,007	2,2	27	31
14,2	6,6	1,4	2,1	0,018	0,013	1,4	32	27
1,7	2,1	1,0	0,8	0,015	0,008	1,8	29	29
0,8	0,8	1,0	1,0	–	–	–	–	–
8,7	10,4	0,3	0,8	0,012	0,017	0,7	31	22
10,6	10,6	1,0	1,0	0,051	0,067	0,7	31	14

Показатели сопротивляемости грунтов сдвигу – при испытаниях в приборе одноплоскостного прямого среза.

2.47. Эффект снижения прочности при обводнении наблюдается у всех разновидностей грунтов изученного района при степени влажности < 1, а его интенсивность зависит от водонасыщенности грунтов до замачивания, их плотности, степени изменения консистенции и водоустойчивости структурных связей. Практически у всех грунтов после замачивания уменьшается величина удельного сцепления. В меньшей степени и не всегда закономерно происходит изменение и угла внутреннего трения (см. табл. 4 и 5).

Наименование грунта	Число пластичности I_p	Плотность сухого грунта ρ_d	Коэффициент пористости e	Влажность естественная W	Степень влажности S_r	Изменение характеристик механических свойств грунтов при взаимодействии с водой: Схема опыта
Суглинок лессовидный, ed III–II	8,1	1,55	0,742	14,0	0,52	I* II**
Суглинок озерно-аллювиальный la^3 III	9,6	1,54	0,734	21,1	0,77	I II
Суглинок озерно-аллювиальный la^2 III	13,4	1,60	0,644	23,2	0,95	I II
Суглинок озерно-аллювиальный la^2 III	–	0,83	1,950	63,0	0,79	I II
Суглинок аллювиальный, a^1 III	8,9	1,53	0,765	26,4	0,98	I II
Суглинок гумусированный l IV	–	0,42	3,620	183,0	0,98	I II
Глина пойменного аллювия a IV	38,6	0,96	1,600	64,0	1,00	I II
Суглинок пойменного аллювия a IV	12,8	1,27	1,100	30,5	0,74	I II

Примечание. Значения показателей прочности и сжимаемости получены при испытаниях в стабилометре по методике Н.Н. Сидорова.
* – результаты испытаний образцов с естественной влажностью.
** – результаты испытаний образцов, водонасыщенных до состояния полной влагоемкости.

Таблица 5

Модуль деформации E при σ_3			Показатели прочности		$K^E_{п.вод.} = \frac{E_{ест.}}{E_{вод.}}$ при σ_3			$K^C_{п.вод.} = \frac{C_{ест.}}{C_{вод.}}$
0,025 МПа	0,05 МПа	0,1 МПа	$\varphi°$	C, МПа	0,025 МПа	0,05 МПа	0,1 МПа	
27,0	27,0	27,0	29	0,050				
0,7	0,9	1,6	8	0,008	38,6	30,0	16,9	6,3
15,0	15,0	15,0	26	0,055				
0,3	0,3	0,6	5	0,016	50,0	50,0	25,0	3,4
2,8	3,1	5,0	19	0,073				
1,5	1,8	3,2	24	0,040	1,8	1,7	1,6	1,8
5,0	7,5	–	13	0,122				
2,9	3,5	4,7	21	0,080	1,7	2,1	–	1,5
8,2	12,5	10,0	9	0,064				
1,6	2,3	5,2	11	0,042	5,1	5,4	1,9	1,5
–	1,9	2,2	19	0,027				
1,6	1,3	2,5	0	0,056	–	1,3	0,34	0,48
3,7	5,2	3,7	13	0,048				
3,6	3,2	4,3	3	0,046	1,0	1,6	0,86	1,0
2,6	4,0	4,0	21	0,032				
2,9	4,0	5,3	22	0,011	0,8	1,0	0,75	2,9

Особенно сильное снижение прочностных характеристик при обводнении наблюдается у лессовидных и озерно-аллювиальных суглинков с влажностью $< 0,8$, что объясняется высокой пылеватостью этих грунтов и чрезвычайно слабой водоустойчивостью глинистого цемента, связывающего пылеватые и песчаные частицы пород (рис. 10). С увеличением степени водонасыщения и влажности влияние дополнительного замачивания на прочностные свойства пылеватых и глинистых грунтов становится меньшим.

Поведение при подтоплении грунтов с повышенным содержанием органического вещества также зависит от их влажности до развития этого процесса. Дополнительное обводнение органо-минеральных грунтов со степенью влажности $> 0,8$ (что характерно для этих пород в условиях естественного залегания) не оказывает заметного влияния на их прочностные свойства. При меньшей водонасыщенности после взаимодействия с грунтовыми водами сопротивление сдвигу органо-минеральных грунтов может сильно уменьшиться за счет снижения угла внутреннего трения, иногда и удельного сцепления (табл. 4, рис. 11).

2.48. Степень изменения прочности и сжимаемости при развитии процесса подтопления грунтов, залегающих в основаниях сооружений и испытывающих нагрузку, зависит от их напряженного состояния, что необходимо учитывать при прогнозе этих изменений. Влияние напряженно-деформируемого состояния на поведение грунтов при взаимодействии с грунтовыми водами моделируют опыты в стабилометрах. Результаты трехосных испытаний показывают, что при увеличении влажности в грунтах их прочность и деформируемость уменьшается в зависимости от величины всестороннего давления и консистенции. При этом особенно заметно снижается величина удельного сцепления, а у грунтов с повышенным содержанием органического вещества и угол внутреннего трения (рис. 12).

Изменение модуля деформации при разных значениях бокового давления в интервале от 0–0,6 МПа происходит по линейной зависимости, поэтому для его оценки может быть использована линейная аппроксимация. В табл. 6, 7 представлены статистически обработанные результаты трехосных испытаний, отражающих влияние плотности и консистенции пылеватых су-

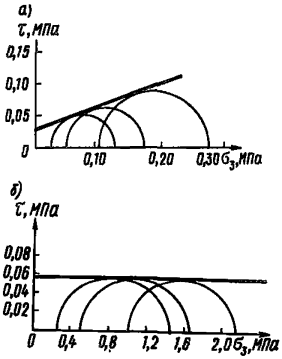


Рис.11. Влияние водонасыщения на сопротивление сдвигу. Суглинок гумусированный. Неконсолидированно-недренированное испытание
а – образец с естественной влажностью; б – образец, предварительно водонасыщенный

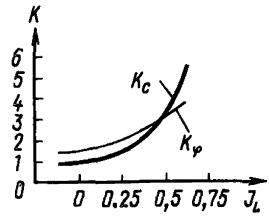


Рис.12. Характер изменения коэффициента структурной прочности озерно-аллювиальных суглинков по данным трехосных испытаний

Таблица 6

Интервалы по J_L	Обозначения характеристик	Характеристики при интервалах при e		
		0,45–0,55	0,55–0,65	0,65–0,75
$I_L \leq 0,5$	C, $1 \cdot 10^5$ Па	0,70	0,50	–
	φ^o	33	30	–
	E, $1 \cdot 10^5$ Па	130	100	–
	$tg\,\alpha$	60	55	–
$-0,5 < I_L \leq 0$	C, $1 \cdot 10^5$ Па	0,50	0,40	0,30
	φ^o	30	28	24
	E, $1 \cdot 10^5$ Па	100	80	50
	$tg\,\alpha$	45	40	35
$0 < I_L \leq 0,25$	C, $1 \cdot 10^5$ Па	0,40	0,30	0,20
	φ^o	25	22	18
	E, $1 \cdot 10^5$ Па	80	60	40
	$tg\,\alpha$	35	30	25
$0,25 < I_L \leq 0,75$	C, $1 \cdot 10^5$ Па	0,30	0,15	0,10
	φ^o	20	16	12
	E, $1 \cdot 10^5$ Па	60	35	30
	$tg\,\alpha$	25	20	15
$I_L > 0,75$	C, $1 \cdot 10^5$ Па	–	0,10	0,05
	φ^o	–	12	10
	E, $1 \cdot 10^5$ Па	–	20	15
	$tg\,\alpha$	–	10	5

Таблица 7

Интервалы по I_L	Обозначения характеристик	Характеристики при e, равных				
		0,55	0,65	0,75	0,85	0,95
$-0,25 < I_L \leq 0$	C, $1 \cdot 10^5$ Па	0,72	0,65	0,60	0,56	0,52
	φ^o	22	21	20	19	18
	E, $1 \cdot 10^5$ Па	150	130	120	110	100
	$tg\,\alpha$	50	55	60	50	40
$0 < I_L \leq 0,25$	C, $1 \cdot 10^5$ Па	0,65	0,58	0,53	0,49	0,45
	φ^o	20	19	18	17	16
	E, $1 \cdot 10^5$ Па	130	110	100	90	80
	$tg\,\alpha$	50	50	45	40	30
$0,25 < I_L \leq 0,50$	C, $1 \cdot 10^5$ Па	0,60	0,53	0,48	0,43	0,38
	φ^o	18	17	16	15	14
	E, $1 \cdot 10^5$ Па	110	100	90	80	70
	$tg\,\alpha$	30	40	35	30	25
$0,50 < I_L \leq 0,75$	C, $1 \cdot 10^5$ Па	–	0,50	0,42	0,35	0,30
	φ^o	–	15	14	13	12
	E, $1 \cdot 10^5$ Па.	–	90	80	70	60
	$tg\,\alpha$	–	35	30	25	20

глинков и супесей на прочностные и деформационные характеристики этих грунтов при разных значениях σ_3. Параметр линейной зависимости $tg\,\alpha$ характеризует нарастание модуля деформации с изменением всестороннего давления.

2.49. Для подавляющего большинства генетических типов грунтов Западной Сибири вибродинамические воздействия приводят к существенному снижению их прочностных и деформативных характеристик. Для оценки степени влияния этих воздействий рекомендуется показатель:

$$K^A_{дин} = \left(1 - \frac{A_{дин}}{A_{ст}}\right) 100\%,$$

где $A_{дин}$ – любой из показателей свойств грунта, определяемый при динамическом воздействии; $A_{ст}$ – тот же показатель, определяемый при действии статической нагрузки.

Показатель снижения характеристик прочности и сжимаемости слабо зависит от частоты пульсации напряжений (в интервале 7–90 Гц). Характер влияния второго показателя вибродинамического воздействия – амплитудного значения пульсации напряжений – следующий: с ростом σ_y до некоторого значения $\sigma_{y\,пр}$ наблюдается уменьшение прочности и рост сжимаемости, проявляющиеся в увеличении $K^{\varphi}_{дин}$, $K^{c}_{дин}$, $K^{E}_{дин}$; в дальнейшем,

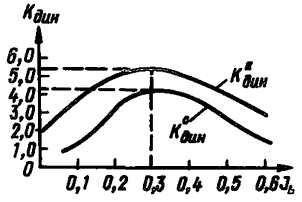


Рис.13. Зависимость показателей относительного снижения сцепления и модуля деформации от консистенции по данным испытаний на вибростабилометре

при $\sigma_д > \sigma_{у\,пр}$ этот рост незначителен или даже прекращается. В зависимости от типа и состояния грунта $\sigma_{у.пр}$= 0,01–0,035 МПа (0,10–0,35 кгс/см^2) (меньшие значения – для супесей, большие – для суглинков и глин; с увеличением влажности значение $\sigma_{у\,пр}$ снижается).

Для песков степень влияния вибродинамической нагрузки зависит главным образом от их гранулометрического состава. Для исследованных песков с большим содержанием пылеватых и примесью глинистых частиц, обладающих некоторым сцеплением и по свойствам приближающимся к супесям, влияние вибродинамической нагрузки существенно. Так, при характеристиках вибродинамического воздействия: частота ν = 17 Гц, амплитудное значение пульсации бокового давления $\sigma_д$ до 0,2 кгс/см^2 (0,02 МПа) значение $K_{дин}$ составили: $K^{\sigma_1}_{дин}$ до 40%; $K^{E}_{дин}$ до 80 %. Такая высокая степень разупрочнения объясняется отмеченной спецификой их гранулометрического состава.

Относительное снижение прочности и рост сжимаемости глинистых грунтов связаны преимущественно с их состоянием по влажности и плотности. Зависимости показателей снижений $K^{\varphi o}_{дин}$, $K^{c}_{дин}$, $K^{E}_{дин}$ от влажности характеризуются максимумами при некотором критическом ее значении, находящемся в интервале, соответствующем тугопластичной консистенции I_L = =0,20–0,40. Причем, по мере роста интенсивности динамического воздействия, максимум потери прочности смещается в область меньших влажностей. Характер зависимостей показан на рис. 13. Значение показателя, характеризующего увеличение сжимаемости ($K^{E}_{дин}$), больше для супесей, чем для суглинков и глин.

Зависимость показателей $K^{\varphi o}_{дин}$, $K^{c}_{дин}$, $K^{E}_{дин}$ для глинистых грунтов от их начальной плотности в целом убывающая: указанные коэффициенты уменьшаются с ростом плотности, при постоянной интенсивности вибродинамического воздействия. Эта зависимость включает два участка, причем на втором интенсивность снижения значения $K_{дин}$ резко возрастает. Для глинистых грунтов нарушенного сложения значение ρ_d, разделяющее указанные два участка, установлено по отношению к максимальной плотности при стандартном уплотнении: ρ_d=0,85–0,90.

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ
ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ
СТРУКТУРНО-НЕУСТОЙЧИВЫХ ГРУНТОВ И ПРОГНОЗА
ИХ ПОВЕДЕНИЯ В УСЛОВИЯХ ПОДТОПЛЕНИЯ

3. ЗАКОНОМЕРНОСТИ ИЗМЕНЕНИЯ СОСТАВА И ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ГРУНТОВ ПРИ ПОДТОПЛЕНИИ ИХ ГРУНТОВЫМИ ВОДАМИ

3.1. Развитие процессов подтопления в пределах застроенных и вновь осваиваемых территорий вызывает существенное изменение консистенции и физико-механических свойств грунтов, что способствует активизации и развитию ряда неблагоприятных процессов и явлений: увеличению сжимаемости, возникновению деформаций просадочности и набухания, проявлению плывунных и тиксотропных свойств в глинистых породах и способности к разжижению песчаных, активизации эрозионных процессов и т.п.

3.2. Физические и физико-химические процессы, возникающие в грунтах при их взаимодействии с природными водами или промстоками по характеру инженерно-геологического влияния на эти грунты могут быть подразделены на три группы:

процессы, влияющие только на консистенцию грунтов;

процессы, вызывающие изменение ионно-солевого комплекса грунтов (состава обменных катионов и поровых вод) и сопровождающиеся изменением степени агрегированности глинистых фракций грунтов;

процессы, сопровождающиеся разрушением солей и минералов или образованием новых соединений, что ведет к глубокому изменению состава и структуры грунтов.

3.3. При подтоплении грунтов слабоминерализованными водами, химический состав которых идентичен составу их поровых вод, происходит изменение только влажности и консистенции грунтов.

Если взаимодействующие с грунтами воды отличаются по составу от содержащихся в породах водорастворимых компонентов, нарушается равновесное состояние ионно-солевого комплекса пород, что оказывает влияние на их структурные связи и степень агрегированности коллоидных частиц.

Процессы третьей группы могут проявляться в условиях длительного избыточного увлажнения при развитии глеевого режима или при воздействии на грунты агрессивных природных вод и промстоков; при вторичном засолении или защелачивании.

Оглеение является весьма характерным процессом, для различных климатических зон, который развивается в условиях подтопления или заболачивания при наличии в грунтах негумифицированных форм органических веществ. В ходе этого про-

цесса происходит восстановление соединений окисного железа и их трансформация в подвижные закисные формы, разрушение глинистых и обломочных минералов и новообразование специфических для восстановительной среды минералов: вивианита, сидерита и др. При этом происходит распадение агрегатов, сцементированных окислами железа, и увеличение в составе пород высокодисперсных фракций, что ведет к резкому ухудшению фильтрационных свойств пород и уменьшению их прочности.

3.4. Особенно сильное воздействие, сопровождающееся глубокой перестройкой структуры грунтов и изменением их состава, оказывают водоносные горизонты, формирующиеся в результате утечек промстоков из растворонесущих коммуникаций химической промышленности, черной и цветной металлургии.

Неагрессивные растворы электролитов вызывают изменение состава обменных катионов, что оказывает влияние на гидрофильность глинистых минералов, характер контактных взаимодействий и степень агрегированности высокодисперсных частиц.

При взаимодействии грунтов с агрессивными кислыми растворами происходит растворение карбонатов и окислов железа, уменьшение емкости обмена и изменение состава поглощенных катионов. При концентрации раствора > 1н разрушаются и глинистые минералы группы монтмориллонита.

Воздействие на грунты агрессивных щелочных промстоков вызывает растворение аморфного кремнезема, разрушение глинистых минералов, образование новых силикатных соединений, изменение состава обменных катионов и увеличение емкости обмена.

3.5. Водоустойчивость слаболитифицированных грунтов и их чувствительность к повышению влагосодержания зависит и от характера структурных связей, на формирование которых оказывают влияние строение диффузных оболочек коллоидно-дисперсных частиц и наличие веществ, способных образовывать в объеме осадка химические (цементационные) связи.

Выраженной способностью к самопроизвольной гидратации при дополнительном водонасыщении отмечаются грунты со стабилизационными структурами, образование которых происходит при наличии в диффузных оболочках активных гидрофильных стабилизаторов: одновалентных катионов Na^+ и K^+ и насыщенных этими ионами поверхностно-активных органических веществ, образующих на реакционноспособных центрах глинистых минералов структурированные сферы. Независимо от степени уплотнения, породы со стабилизационными структурами при взаимодействии с водой самопроизвольно гидратируются и при этом резко снижают характеристики механических свойств. Слабоуплотненные разновидности этих пород при нарушении естественного сложения проявляют плывунные свойства.

Сравнительно малой водоустойчивостью обладают структурные связи коагуляционного типа. Они образуются в осадках с небольшим содержанием электролитов 0,3–1,5 % при насыщении обменного комплекса поливалентными катионами Ca и Mg. При взаимодействии с водой контакты коагуляционного типа легко нарушаются, что ведет к существенному уменьшению прочности и увеличению деформируемости этих грунтов. Слабоуплотненные водонасыщенные глинистые и органо-минеральные грунты с коагуляционными структурами проявляют тиксотропные свойства.

Влияние обводнения на прочностные и деформационные свойства грунтов с цементационными структурами зависит от растворимости природных цементов во взаимодействующих с грунтами водах или промстоках, а также от их устойчивости в условиях длительного избыточного увлажнения. Цементационные связи в дисперсных грунтах могут образовываться при срастании кристаллов солей, главным образом карбонатов и сульфатов; при химическом взаимодействии молекул неорганических полимеров, представленных аморфной SiO_2 и гидроокислами железа и алюминия, а также при ассоциации макромолекул гуминовых и других органических соединений, содержащих реакционноспособные группы.

3.6. Поведение грунтов при дополнительном водонасыщении зависит и от химического состава взаимодействующих с ними вод. Наибольший эффект ухудшения физико-механических свойств следует ожидать при подтоплении территорий слабоминерализованными водами, содержащими поверхностно-активные вещества, действующие как природные "понизители твердости". В соответствии с составом и строением образующихся на поверхности глинистых частиц адсорбционных слоев, эти вещества делятся на две группы.

Первую группу составляют неорганические электролиты, присутствие которых влияет на электрокинетический потенциал и толщину диффузных оболочек вокруг глинистых частиц. К ним относятся водорастворимые соли $NaCl$, $MgCl_2$ и Na_2SO_4. Ионы щелочных металлов вытесняют из обменного комплекса пород поливалентные катионы, после чего гидрофильность частиц твердой фазы увеличивается. Подобные вещества активно действуют только при малых концентрациях.

Вторую группу составляют органические и органо-минеральные вещества, обладающие способностью образовывать на поверхности коллоидно-дисперсных минералов ориентированные гидрофильные пленки. Эффективность влияния этих веществ на структуру грунтов возрастает пропорционально их концентрации в растворах, стремясь к предельному значению.

3.7. При взаимодействии с водой и водными растворами глинистых и органо-минеральных грунтов с влажностью менее гра-

ницы текучести возникают объемные деформации набухания и давление набухания вследствие осмотического впитывания влаги и гидратации глинистых минералов.

Величина набухания зависит от состава твердой и жидкой фазы грунтов, их структуры, внешнего давления на грунт и химического состава взаимодействующих с грунтами вод, температуры и других факторов.

Экспериментально установлено, что с уменьшением влажности и увеличением плотности глинистых пород их способность к набуханию возрастает. Между показателями, характеризующими давление и деформацию набухания, и влажностью грунтов наблюдается зависимость, приближающаяся к линейной.

Наиболее интенсивно этот процесс проявляется в глинах монтмориллонитового состава, частицы которых обладают способностью к *межслоевой адсорбции*. При гидратации монтмориллонита межслоевое расстояние в частицах в зависимости от состава обменных катионов увеличивается на 8–12 Å. Минералы с жесткой кристаллической решеткой типа каолинита связывают значительно меньшее количество воды, вследствие чего их объем при набухании изменяется мало.

Присутствие в грунтах электролитов вызывает осмотическое впитывание воды в том случае; если их концентрация в породах выше, чем во взаимодействующих с ними водах или растворах. Установлено, что максимальное набухание происходит при взаимодействии пород с растворами электролитов низкой концентрации (< 0,001н). При увеличении концентрации растворов набухание глин уменьшается, что обусловлено сжатием диффузного слоя.

Влияние обменных катионов проявляется при взаимодействии с растворами, концентрация которых менее 1н. Максимальное набухание наблюдается при насыщении обменного комплекса ионами Na^+ и Mg^{2+}, минимальная – при насыщении ионами Ca^{2+} и Fe^{3+}.

Насыщение обменного комплекса глинистых пород ионом K^+ приводит к уменьшению набухания, понижению пластичности и увеличению их прочности.

В тех случаях, когда концентрация электролитов во взаимодействующих с глинистыми грунтами водах выше порога коагуляции коллоидно-дисперсных частиц, происходят процессы компактной коагуляции последних. По данным Злачевской (1972), сжимаемость образцов монтмориллонитовых глин с увеличением в составе порового раствора $NaCl$ до 1н уменьшается в три раза по сравнению с сжимаемостью глин, замешенных на воде. Взаимодействие глинистых пород с растворами $NaCl$ при концентрациях менее 0,1н вызывает уменьшение прочности породы, при концентрациях > 0,1н способствует ее повышению.

3.8. Процесс подъема уровня грунтовых вод вызывает изменение напряженного состояния вследствие гидростатического и

гидродинамического взвешивания структурных элементов, что может привести к снижению прочности грунтов и дополнительным осадкам, которые нужно учитывать при расчетах деформаций оснований.

4. СОСТАВ ИССЛЕДОВАНИЙ НА РАЗЛИЧНЫХ ЭТАПАХ ИЗЫСКАНИЙ

4.1. При наличии в районе изысканий потенциально подтопляемых территорий, материалы инженерно-геологических исследований должны обеспечить разработку прогноза неблагоприятных изменений, влажностного режима и физико-механических свойств грунтов в условиях их подтопления грунтовыми водами.

В зависимости от степени изученности территорий и целевых задач исследований, соответствующих отдельным этапам изысканий, требования к точности прогнозной оценки неодинаковы, что обусловливает необходимость дифференцированного подхода к выбору методики прогноза на различных стадиях изысканий.

4.2. В соответствии с положениями Инструкции СН 225-79, изыскания для промышленного строительства должны проводиться в два этапа и включать:

а) изыскания для выбора площадки строительства с целью получения материалов, необходимых для оценки и сравнения намеченных заказчиком вариантов размещения строительных объектов;

б) изыскания на выбранной площадке, основным содержанием которых является обеспечение материалов для разработки генерального плана и проектирования зданий, сооружений, включая коммуникаций.

Составление прогноза на первом этапе изысканий рекомендуется осуществлять методами расчетным или аналоговым, используя фондовые материалы ранее проведенных исследований и результаты рекогносцировки.

На втором этапе производят уточнение предварительного прогноза по материалам натурных исследований на ключах и данным экспериментального моделирования.

4.3. Состав и методика исследований на первом этапе зависят от степени изученности территории и видов намечаемого строительства.

В пределах освоенных городских территорий следует провести сбор, обобщение и анализ материалов, ранее проведенных исследований инженерно-геологических, гидрологических и гидрометеорологических условий района и осуществить рекогносцировку территории, намеченной для строительства.

4.4. По материалам гидрогеологических исследований следует оценить степень потенциальной подтопляемости территории и

выявить причины, факторы и источники возможного подтопления, а также установить подверженность территории сезонному подтоплению, его повторяемость и тип. Комплекс указанных работ следует выполнять по методике, изложенной в Рекомендациях по прогнозам подтопления промышленных площадок грунтовыми водами. М., ВНИИ ВОДГЕО, 1976 г.

4.5. На этом этапе изысканий приближенная оценка изменения физико-механических свойств грунтов в условиях обводнения может быть получена в результате статистической обработки материалов лабораторных исследований прошлых лет, если они содержат результаты испытаний прочности и сжимаемости грунтов в разных условиях увлажнения (при естественной влажности и после полного водонасыщения).

4.6. При наличии в районе изысканий подтопленных территорий с близкими природными условиями следует оценить степень изменения физического состояния и механических свойств грунтов в условиях избыточного увлажнения с учетом длительности подтопления отдельных участков, характера их застройки, а также степени консолидации грунтов, залегающих в основаниях сооружений. По материалам этих работ может быть составлен предварительный прогноз ожидаемых изменений аналоговым методом.

Сопоставляемые участки должны характеризоваться одинаковым геолого-литологическим строением разреза; слагающие их грунты должны быть представлены одним литолого-фациальным типом — желательно породами одного и того же инженерно-геологического элемента, и быть близкими по дисперсности, содержанию органического вещества и другим компонентам состава, а также по структурным особенностям; воды, вызывающие обводнение поверхностных отложений, должны быть близкими по химическому составу.

Прогноз возможных изменений свойств грунтов осуществляется в данном случае путем оценки изменений, уже произошедших на подтопленных территориях.

4.7. В ходе рекогносцировки особое внимание должно быть уделено исследованию условий увлажнения и дренирования поверхностных отложений с учетом их геоморфологического положения. Выявление территорий с разной степенью дренированности и заболоченных участков может быть проведено путем дешифрирования аэрофотоснимков с использованием ландшафтно-индикационного метода. Особое внимание должно быть уделено оценке природных ландшафтов и почвенно-растительных комплексов, изучение которых необходимо проводить во взаимосвязи с литологией поверхностных отложений (типами разрезов), характером увлажнения и дренированности макро-, мезо- и микроформ рельефа.

При проведении маршрутов следует собрать информацию о неблагоприятных процессах, развивающихся в грунтах под

влиянием обводнения и способных оказывать влияние на устойчивость и эксплуатацию сооружений.

4.8. Выполняя изыскания в малоизученных районах, необходимые для разработки предварительного прогноза материалы должны быть получены при проведении полного комплекса инженерно-геологических и гидрогеологических исследований, что допускается Инструкцией СН 225-79.

Отбор монолитов при инженерно-геологическом опробовании следует проводить на участках с разным характером увлажнения из каждой литологической разновидности грунтов. Общее количество отобранных образцов должно обеспечить выполнение лабораторных исследований для оценки состава и свойств грунтов в природном состоянии и проведения моделирования процессов обводнения грунтов (желательно не менее 5–6 образцов в каждой точке опробования).

4.9. Заключение, составленное по результатам первого этапа изысканий на потенциально подтопляемых территориях, должно содержать их предварительную оценку по подверженности подтоплению, ориентированную количественную оценку степени изменения прочностных и деформационных характеристик грунтов в условиях максимального обводнения и схематическую геолого-литологическую карту участка изысканий с элементами прогноза изменения инженерно-геологических условий при неблагоприятных изменениях водного обмена.

Выполненные на этом этапе исследования ландшафтных индикаторов следует использовать для предварительного районирования территории по особенностям влажностного режима грунтов и выбора ключевых участков для проведения стационарных наблюдений.

4.10. Состав и объем исследований на выбранной площадке строительства устанавливают в зависимости от сложности природных условий, изученности территории и конструктивных особенностей проектируемых зданий и сооружений, в соответствии с имеющимися нормативными документами. Дополнительно они должны включать комплекс стационарных наблюдений, полевых и лабораторных работ, необходимых для осуществления количественного прогноза изменения инженерно-геологических условий, состава и свойств грунтов при развитии процессов подтопления с учетом воздействия строящихся объектов в целом и отдельных зданий и сооружений.

4.11. В состав работ на данной стадии следует включить анализ ранее проведенных исследований, а также сбор и обобщение дополнительных материалов по отдельным невыясненным вопросам.

Инженерно-геологическую съемку территории изысканий необходимо выполнять с учетом потенциальной подтопляемости ее отдельных участков. Установление причин и факторов подтопления, его видов ("скрытого" или "явного"), степени подтопля-

емости площадки, типизацию по условиям сезонного подтопления следует проводить по методике, данной в Рекомендациях, указанных в п. 4.4.

В пределах подтопляемых территорий следует выделить и ограничить участки, при дополнительном обводнении которых может произойти достаточно интенсивное ухудшение инженерно-геологических свойств грунтов и проявиться неблагоприятные процессы и явления (большие и неравномерные осадки, просадочные деформации, тиксотропное разупрочнение, разжижение, развитие давления и деформаций набухания и т.п.).

4.12. По результатам рекогносцировки и инженерно-геологической съемки намечаются репрезентативные участки для стационарных исследований и режимных наблюдений. При выборе участков должны учитываться типы ландшафтов, строение поверхностных отложений и гидрогеологические условия.

4.13. Исследования на ключевых участках должны включать:

а) детальное изучение геолого-литологического разреза, вещественного состава, структурно-текстурных особенностей и физико-механических свойств характерных горизонтов;

б) наблюдения за динамикой гидрогеологических условий, температурного и влажностного режима грунтов, а также их состояния в годовом и многолетнем циклах;

в) изучение закономерностей изменения физико-механических свойств грунтов при сезонных изменениях влажности на застроенных и незастроенных участках и при их подтоплении.

Глубина изучения разрезов определяется уровнем залегания грунтовых вод или мощностью зоны годовых изменений влажности. В разрезе детально исследуется изменение влажности и водонасыщенности грунтов с глубиной и по отдельным литологическим горизонтам, фиксируется положение водоупоров.

Режимные наблюдения за изменениями влажности целесообразно проводить с помощью дистанционных датчиков, прежде всего нейтронными измерителями влажности, комплексируя их с гидрогеологическими наблюдениями в одних и тех же скважинах.

Изучение сезонной динамики влажности в грунтах путем повторного бурения с отбором проб на влажность возможно осуществлять только при достаточной однородности состава и структуры поверхностных отложений. Для условий Западной Сибири этот метод неприменим вследствие изменчивости показателей состава по глубине и по простиранию отдельных литологических горизонтов.

4.14. Результаты режимных наблюдений отражают на графиках послойного изменения влажности (хроноизоплеты) и эпюрах, характеризующих ее временные изменения по глубине.

В переходные периоды года, а также при экстремальном обводнении грунтов целесообразно проводить опробование опор-

ных разрезов с отбором монолитов для изучения физико-механических свойств грунтов.

На участках с характерными условиями увлажнения целесообразно организовать опыты, моделирующие влияние процессов подтопления на грунты, с помощью полевых методов исследования.

4.15. При изысканиях под отдельные здания и сооружения предварительный прогноз уточняется путем выполнения модельных экспериментов, по результатам которых устанавливают прогнозные значения расчетных показателей механических свойств грунтов на площадке изысканий в момент их подтопления.

При постановке опытов на этой стадии необходимо учитывать конструктивные и эксплуатационные особенности проектируемых сооружений, вид подтопления и начало его развития, а также условия напряженного состояния и степень консолидации грунтовых оснований в период их дополнительного обводнения.

При подготовке образцов к испытаниям следует учитывать характер физико-химических процессов, возникающих в грунтах при их длительном взаимодействии с грунтовыми водами (выщелачивание, оглеение и др.).

5. ОЦЕНКА ИЗМЕНЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ В УСЛОВИЯХ ПОДТОПЛЕНИЯ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ СТАТИСТИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ

5.1. Косвенная оценка строительных свойств грунтов различного возраста и генезиса и прогноз изменения этих свойств под влиянием увлажнения могут быть выполнены на основе статистической обработки материалов изысканий прошлых лет и современных исследований, если они содержат данные параллельных определений физических и механических свойств грунтов в различных условиях увлажнения.

5.2. Материал, предназначенный для обработки, должен быть разделен по возрасту, генезису, литолого-фациальной принадлежности и другим признакам, определяющим структурные особенности грунтов и, следовательно, характер взаимосвязей между показателями свойств, а также их изменение при увеличении влажности в грунтах.

5.3. Для исключения влияния условий эксперимента определение характеристик физико-механических свойств должно быть выполнено по единой методике, желательно в одной и той же лаборатории.

5.4. Присутствие в грунтах органического вещества, даже в небольших концентрациях, приводит к появлению резких отклонений в значениях показателей прочностных и деформационных свойств (табл. 8).

Таблица 8

Концентрация органического вещества $C_{орг}$, %	Показатели физических свойств						Показатели механических свойств		
	W, %	$W_т$, %	$W_р$, %	ρ_d, г/см^3	ρ_s, г/см^3	e	E, $1 \cdot 10^5$ Па	$tg\ \varphi$	C, $1 \cdot 10^5$ Па
	Не менее								
< 1	До 40–45	До 55–60	До 25–30	1,0	2,65–2,7	До 1,15	50–160	0,3–0,7	0,1–0,5
1–3	То же	То же	То же	1,0	2,65–2,7	" 1,5	10–50	0,2–0,55	0,1–0,3
3–5 и св.	До 200–250	До 300	До 200	0,25–0,9	1,45–2,5	До 4–5	< 20	0,15–0,20	0,06–0,1

5.5. Органическое вещество влияет не только на величину средних значений и дисперсий показателей, но также на характер взаимосвязей между ними, поэтому статистическая обработка данных по свойствам грунтов, не содержащих органического вещества, и органо-минеральных разностей должна производиться отдельно.

5.6. Данные, относящиеся к грунтам с повышенным содержанием железа, должны исключаться из статистической обработки или их следует объединить в отдельную выборку.

ОБРАБОТКА ДАННЫХ ПО СВОЙСТВАМ ГЛИНИСТЫХ И ПЫЛЕВАТЫХ ГРУНТОВ, НЕ СОДЕРЖАЩИХ ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА

5.7. Приводимые ниже данные относятся к четвертичным отложениям пойм и надпойменных террас аллювиального и озерно-аллювиального генезиса районов Тюменского и Томского Приобья; литологически они представлены глинами и суглинками, ненабухающими и непросадочными, с различной степенью водонасыщения.

5.8. Сопоставление значений E, φ и C, полученных для искусственно водонасыщенных образцов, с аналогичными характеристиками идентичных по составу и структуре грунтов, насыщенных в условиях естественного залегания, показало, что они близки между собой, поэтому ориентировочный прогноз изменения физико-механических свойств грунтов в условиях подтопления может быть выполнен на основе зависимостей, полученных для грунтов с высокой степенью водонасыщения.

5.9. Задача прогноза показателей механических свойств грунтов по их физическим характеристикам может ставиться двумя способами: на основе парных корреляционных зависимостей внутри предварительно выделенных узких классов; на основе многомерных зависимостей, с учетом наиболее информативных классификационных показателей.

5.10. В первом случае предварительная классификация материала производится по числу пластичности (на суглинки и глины) и по степени водонасыщения $S_r < 0{,}85$; S_r – 0,85–0,9; $S_r > 0{,}9$.

5.11. На первом этапе обработки внутри каждого из выделенных классов строятся точечные графики парных зависимостей между каждым из показателей механических свойств (E, φ, C) и показателями физических свойств (W, W_T, W_P, ρ_d, ρ, e и др.). Графики дают возможность провести анализ и отбраковку "отскоков" резко отличающихся наблюдений и предварительно (визуально) оценить наличие связи между показателями (рис. 14–16).

5.12. Подбор аппроксимирующих функций для перспективных зависимостей производится с помощью программы ГРА-

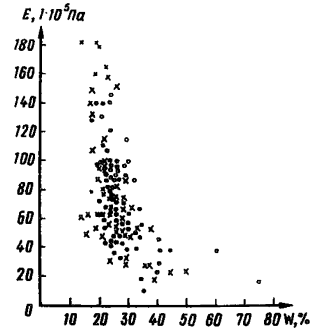


Рис.14. Зависимость между модулем деформации и естественной влажностью глинистых и пылеватых грунтов

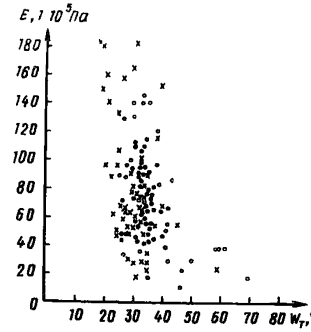


Рис.15. Зависимость между модулем деформации и пределом текучести глинистых и пылеватых грунтов

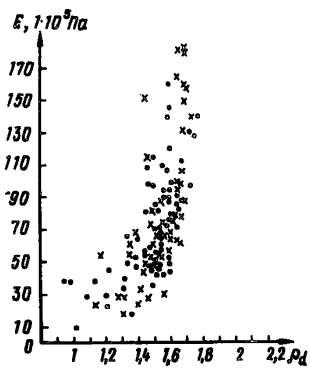


Рис.16. Зависимость между модулем деформации E и плотностью сухого грунта ρ_d глинистых и пылеватых грунтов

ФИК "Выбор наилучшей аппроксимации для описания экспериментального материала парной зависимостью ГРАФИК" (см. прил. 1). Программа находит коэффициенты девяти наиболее распространенных видов зависимостей (прямая, парабола, гипербола, логарифмика и т.д.), оценивает качество аппроксимации каждой из них и выбирает наилучшую (обеспечивающую минимум остаточной дисперсии).

5.13. Ниже приводятся уравнения, полученные в результате обработки большого объема фактического материала по данным лабораторных исследований свойств грунтов, указанных в п.5.7.

Приведенные уравнения (табл. 9–11) позволяют получить ориентировочный прогноз показателей сжимаемости и прочности аналогичных типов грунтов в зависимости от состава, степени водонасыщенности и наличия в имеющихся материалах тех или иных физических характеристик[1].

5.14. Для оценки точности прогноза к каждому уравнению дается стандартная ошибка прогноза ($\hat{s}$), величина которой одновременно указывает на тесноту связи между прогнозируемым и прогнозирующим показателем. Чем больше отличается стандартная ошибка прогноза ($\hat{s}$) от исходного стандарта (s_y), тем теснее взаимосвязь между показателями. При необходимости величина парного коэффициента корреляции может быть вычислена по формуле

$$r = \sqrt{1 - \frac{\hat{s}^2}{s_y^2}}.$$

5.15. Для прогноза модуля деформации наиболее информативными характеристиками являются показатели структуры ρ_d, e и влажности S_r, W, в меньшей степени – пластичности W_T, W_p.

5.16. Для прогноза показателей прочности наиболее информативными характеристиками, как правило, являются показатели гранулометрического состава и пластичности, отражающие глинистость грунта. В некоторых случаях прогнозирующими являются показатели структуры ρ_d, e.

5.17. Косвенная оценка механических свойств грунтов может быть выполнена также по комплексу физических характеристик, на основе методов многомерного корреляционно-регрессионного анализа. В этом случае в обработку целесообразно включать только те показатели, которые оказались информативными при анализе парных зависимостей.

---

1 W – естественная влажность
W_T – верхний предел пластичности
W_p – нижний предел пластичности
ρ_d – плотность сухого грунта
ρ – плотность грунта
e – коэффициент пористости
$d^м > 0{,}005$, $d^м < 0{,}005$ } микроагрегатный состав
$d > 0{,}05$, d $0{,}05–0{,}005$, $d < 0{,}005$ } гранулометрический состав
$d < 0{,}005$, $d < 0{,}001$ } коэффициент агрегированности

Таблица 9

Суглинки			
$S_r = 0{,}85-0{,}9$	$\frac{s_y^*}{\hat{s}}$	$S_r > 0{,}9$	$\frac{s_y}{\hat{s}}$
Вид зависимости		Вид зависимости	
$E = \frac{3852{,}8}{W} - 89{,}62$	$\frac{36{,}8}{20{,}8}$	$E = 108{,}38\rho_d - 101{,}37$	$\frac{19{,}0}{17{,}0}$
$E = \frac{4812{,}8}{W_т} - 97{,}76$	$\frac{38{,}3}{23{,}9}$	$E = -103{,}7e + 143{,}31$	$\frac{19{,}0}{16{,}8}$
$E = \frac{4354{,}1}{W_p} - 164{,}45$	$\frac{38{,}3}{31{,}1}$	$E = 0{,}885 d_{<0{,}05} + 44{,}17$	$\frac{20{,}1}{18{,}1}$
$E = 237{,}04\rho_d - 294{,}24$	$\frac{36{,}8}{24{,}0}$	$E = -0{,}054 d^2_{0{,}05-0{,}005} + 3{,}983 d_{0{,}05-0{,}005} + 12{,}8$	$\frac{20{,}1}{13{,}0}$
$E = 6971{,}42 \lg^2 \rho_d - 1711{,}41 \lg \rho_d + 138{,}99$	$\frac{36{,}8}{23{,}7}$		
$E = \frac{120{,}49}{e} - 91{,}78$	$\frac{36{,}8}{22{,}7}$		
$E = 6{,}67 d^м_{>0{,}005} - 526{,}14$	$\frac{39{,}7}{29{,}6}$		

Глины					
$S_r < 0{,}85$	$\frac{s_y}{\hat{s}}$	$S_r = 0{,}85-0{,}9$	$\frac{s_y}{\hat{s}}$	$S_r > 0{,}9$	$\frac{s_y}{\hat{s}}$
Вид зависимости		Вид зависимости		Вид зависимости	
$E = \frac{2737{,}8}{W} - 51{,}825$	$\frac{26{,}6}{18{,}1}$	$E = \frac{3940{,}5}{W} - 85{,}545$	$\frac{37{,}9}{24{,}6}$	$E = \frac{2804{,}5}{W} - 25{,}94$	$\frac{27{,}4}{22{,}6}$
$E = -120{,}31 \lg W_т + 241{,}49$	$\frac{25{,}8}{22{,}9}$	$E = \frac{2428{,}2}{W_e} - 62{,}932$	$\frac{37{,}9}{33{,}0}$	$E = 162{,}01\rho_d - 168{,}94$	$\frac{27{,}4}{22{,}2}$
$E = \frac{2050{,}4}{W_т} - 4{,}166$	$\frac{25{,}8}{23{,}0}$	$E = 4834{,}79 \lg^2 \rho_d - 880{,}06 \lg \rho_d + 69{,}843$	$\frac{37{,}9}{26{,}5}$	$E = \frac{79{,}126}{e} - 26{,}828$	$\frac{27{,}4}{22{,}6}$
$E = 82{,}076\rho_d - 58{,}89$	$\frac{25{,}8}{18{,}3}$				
$E = -40{,}45\rho + 139{,}87$	$\frac{25{,}8}{20{,}1}$	$E = \frac{96{,}304}{e} - 59{,}197$	$\frac{32{,}4}{19{,}2}$		
$E = -147{,}88 \lg e + 47{,}67$	$\frac{25{,}8}{19{,}4}$	$E = -2{,}04 d^м_{>0{,}005} + 226{,}71$	$\frac{32{,}4}{29{,}1}$		

*s_y – исходный стандарт модуля деформации E ($1 \cdot 10^5$ Па).
$\hat{s}$ – стандартная ошибка прогноза модуля деформации E ($1 \cdot 10^5$ Па).

Таблица 10

Суглинки			
$S_r < 0{,}85$	$\frac{s_y}{\hat{s}}$	$S_r = 0{,}85-0{,}9$	$\frac{s_y}{\hat{s}}$
Вид зависимости		Вид зависимости	
$\varphi = -\frac{24{,}8}{d_{<0{,}005}} + 37{,}89$	$\frac{7{,}0}{6{,}5}$	$\varphi = -\frac{562{,}33}{W} + 1{,}79$	$\frac{6{,}1}{3{,}4}$
$\varphi = 4{,}94 d_{<0{,}005} + 14{,}78$	$\frac{7{,}0}{6{,}6}$	$\varphi = \frac{647{,}99}{W_т} + 2{,}41$	$\frac{6{,}0}{4{,}3}$
$\varphi = 0{,}209 d_{>0{,}05} + 19{,}26$	$\frac{7{,}2}{6{,}8}$	$\varphi = 1272{,}45 \lg^2 \rho_d - 351{,}07 \lg \rho_d + 44{,}41$	$\frac{6{,}1}{4{,}1}$
$\varphi = -0{,}225 d_{0{,}05-0{,}005} + 35{,}47$	$\frac{7{,}0}{6{,}4}$	$\varphi = \frac{16{,}72}{e} + 2{,}35$	$\frac{6{,}1}{3{,}8}$

Глины					
$S_r < 0{,}85$	$\frac{s_y}{\hat{s}}$	$S_r = 0{,}85-0{,}9$	$\frac{s_y}{\hat{s}}$	$S_r > 0{,}9$	$\frac{s_y}{\hat{s}}$
Вид зависимости		Вид зависимости		Вид зависимости	
$\varphi = \frac{321{,}39}{W} + 9{,}44$	$\frac{6{,}4}{6{,}0}$	$\varphi = -34{,}301e^2 + 52{,}806e + 0{,}627$	$\frac{4{,}4}{3{,}6}$	$\varphi = 0{,}207 d_{>0{,}05} + 16{,}09$	$\frac{4{,}7}{4{,}3}$
$\varphi = -5{,}92 d_{<0{,}005} + 33{,}18$	$\frac{6{,}3}{6{,}0}$	$\varphi = -13{,}23e + 30{,}74$	$\frac{4{,}4}{3{,}6}$	$\varphi = \frac{423{,}93}{d_{0{,}05-0{,}005}} + 10{,}214$	$\frac{4{,}7}{4{,}6}$
		$\varphi = -14{,}51 \lg d_{<0{,}005} + 23{,}473$	$\frac{3{,}2}{2{,}6}$	$\varphi = 0{,}022 d^2_{<0{,}005} - 1{,}955 d_{<0{,}005} + 59{,}13$	$\frac{4{,}7}{4{,}2}$

Суглинки					
$S_r < 0{,}85$	$\frac{s_y}{\hat{s}}$	$S_r = 0{,}85-0{,}9$	$\frac{s_y}{\hat{s}}$	$S_r > 0{,}9$	
Вид зависимости		Вид зависимости		Вид зависимости	
$C = -0{,}121 a_{<0{,}005} + 0{,}607$	$\frac{0{,}18}{0{,}16}$	$C = -0{,}011W + 0{,}479$	$\frac{0{,}11}{0{,}09}$	$C = \frac{1{,}752}{a_{<0{,}05}} + 0{,}098$	
		$C = -\frac{1{,}101}{\rho_d} + 0{,}923$	$\frac{0{,}11}{0{,}09}$	$C = 0{,}008 d_{0{,}05-0{,}005} - 0{,}236$	
		$C = 0{,}45\rho_d - 0{,}52$	$\frac{0{,}11}{0{,}09}$	–	
		$C = 0{,}4e + 0{,}511$	$\frac{0{,}11}{0{,}099}$	–	
		$C = 0{,}088 a_{<0{,}005} + 0{,}063$	$\frac{0{,}11}{0{,}10}$	–	

5.18. Расчет многомерных уравнений регрессии может быть выполнен с помощью программы "Шаговая множественная линейная регрессия" (*Математическое обеспечение* ЕС ЭВМ, ч.II, Минск, 1973), реализующей последовательное включение факторов-аргументов с одновременной проверкой их эффективности на каждом этапе. Проверка осуществляется по критерию Фишера и показывает, насколько существенно снижается остаточная дисперсия результирующего уравнения при включении каждого нового аргумента. Первым в уравнение автоматически включается признак, наиболее тесно связанный с прогнозируемым показателем. Корреляционная матрица выводится на печать. Дальнейший выбор косвенных показателей осуществляется в соответствии с рассчитываемой матрицей частных коэффициентов корреляции, при этом на каждом этапе производится ревизия ранее включенных признаков. Программа печатает в каждом цикле коэффициенты уравнения регрессии, параметры распределения всех факторов, коэффициент множественной корреляции, остаточную дисперсию, а также некоторую вспомогательную информацию.

5.19. Учитывая нелинейность большинства парных зависимостей между модулем деформации и показателями физических свойств, связанную с логнормальным распределением модуля деформации, целесообразно при расчете многомерных зависимостей использовать логарифм этой величины.

5.20. Табл. 12 содержит примеры многомерных уравнений регрессии для косвенной оценки логарифма компрессионного модуля деформации (E, $1 \cdot 10^5$ Па) аллювиальных глинистых грунтов Приобья, не содержащих органического вещества.

Таблица 11

Глины					
$\frac{s_y}{\hat{s}}$	$S_r = 0{,}85 - 0{,}9$	$\frac{s_y}{\hat{s}}$	$S_r > 0{,}9$		$\frac{s_y}{\hat{s}}$
	Вид зависимости		Вид зависимости		
$\frac{0{,}14}{0{,}10}$	$C = -\frac{8{,}827}{W} - 0{,}062$	$\frac{0{,}07}{0{,}04}$	$C = -\frac{0{,}222}{a_{<0{,}001}} + 0{,}208$		$\frac{0{,}13}{0{,}12}$
$\frac{0{,}14}{0{,}12}$	$C = -\frac{12{,}423}{W_T} - 0{,}076$	$\frac{0{,}07}{0{,}06}$	–		
	$C = 0{,}497\rho_d - 0{,}458$	$\frac{0{,}07}{0{,}04}$	–		
	$C = \frac{0{,}396}{a_{<0{,}001}} + 0{,}155$	$\frac{0{,}07}{0{,}05}$	–		
	$C = -\frac{1{,}285}{a_{>0{,}05}} + 0{,}439$	$\frac{0{,}10}{0{,}08}$	–		

Многомерные уравнения регрессии для оценки коэффициента трения приведены в табл. 13.

5.21. Проверка данных табл. 12 и 13 на независимом фактическом материале показала удовлетворительное качество прогноза (в пределах $\pm 2\,\hat{s}$ при 0,95%-ном уровне доверительной вероятности).

5.22. Использование многомерных уравнений регрессии для косвенной оценки сцепления малоэффективно. Низкие значения коэффициентов корреляции (табл. 14) указывают на невысокую точность прогноза.

Таблица 12

Вид зависимости	Множественный коэффициент корреляции R	Стандартная ошибка прогноза $\hat{s}$
1. $\lg E = 1{,}272\rho_d + 0{,}008W_T - 0{,}340$	0,69	0,17
2. $\lg E = 0{,}714e + 0{,}004W + 2{,}492$	0,65	0,19
3. $\lg E = 0{,}740e + 0{,}006W + 0{,}004W_T + 2{,}444$	0,66	0,18
4. $\lg E = 0{,}106S_r + 0{,}806e + 2{,}379$	0,65	0,19

Таблица 13

Вид зависимости	Множественный коэффициент корреляции R	Стандартная ошибка прогноза $\hat{S}$
1. $tg\varphi = 0{,}617 - 0{,}0061 d_{<0{,}005} - 0{,}008 W + 0{,}2245 e$	0,57	0,9
2. $tg\varphi = 0{,}643 - 0{,}0065 d_{0{,}005} - 0{,}0052 W + 0{,}0028 W_T$	0,53	0,10
3. $tg\varphi = 0{,}669 - 0{,}0058 d_{<0{,}005} - 0{,}0034 W$	0,52	0,10
4. $tg\varphi = 1{,}018 - 0{,}4059 S_r - 0{,}0056 W_T - 0{,}0015 d_{0{,}05-0{,}005}$	0,51	0,11
5. $tg\varphi = 0{,}987 - 0{,}4307 S_r - 0{,}0058 W_T - 0{,}0058 d_{0{,}005}$	0,51	0,11
6. $tg\varphi = 0{,}973 - 0{,}43 S_r - 0{,}0058 W_T$	0,49	0,12

Таблица 14

Вид зависимости	Множественный коэффициент корреляции R
1. $\lg C = -0{,}820 + 0{,}0170 W_T - 0{,}2964 e - 0{,}0066 W + 0{,}004 a_{<0{,}001}$	0,32
2. $\lg C = -0{,}830 + 0{,}0177 W_T - 0{,}3035 e - 0{,}006 W$	0,31

ОБРАБОТКА ДАННЫХ ПО СВОЙСТВАМ ОРГАНО-МИНЕРАЛЬНЫХ ГРУНТОВ

5.23. Обработка данных по свойствам грунтов, содержащих св. 2–3 % органического вещества, выполняется по той же схеме, которая использовалась при обработке грунтов без органики.

5.24. Обработка имевшегося фактического материала по органо-минеральным грунтам Приобья показала, что использование уравнений парной корреляции целесообразно лишь для оценки модуля деформации. Прочностные характеристики органо-минеральных разностей грунтов прогнозируются с очень низкой точностью.

5.25. Зависимости модуля деформации от показателей физических свойств, как правило, нелинейны. Для нахождения аппроксимирующих функций можно пользоваться программой ГРАФИК (см. п. 5.12). Уравнения регрессии для косвенной оценки модуля деформации органо-минеральных водонасыщенных грунтов Приобья по данным предварительной обработки приведены в табл. 15.

5.26. Для дальнейшей обработки по программе ШАГОВАЯ МНОЖЕСТВЕННАЯ ЛИНЕЙНАЯ РЕГРЕССИЯ целесообразно использовать лишь те показатели, которые оказались информативными на предварительном этапе.

Таблица 15

Вид зависимости	Исходный стандарт S_E	Стандартная ошибка прогноза $\hat{S}$
$E = -\frac{814}{W_T} + 7{,}03$	13,3	11,6
$E = -13{,}26 \lg W_p + 38{,}24$	13,3	12,5
$E = 18{,}74 \rho_d^2 - 6{,}97 \rho_d + 9{,}58$	13,3	10,7
$E = -\frac{33{,}53}{e} - 0{,}259$	13,3	10,3
$E = -\frac{122{,}52}{C_{opr}} + 6{,}723$	13,3	11,4

5.27. Учитывая резкую нелинейность парных зависимостей, полученных для органо-минеральных разностей грунтов, при нахождении многомерных уравнений регрессии целесообразно величину модуля деформации E заменить ее логарифмом (так как величина E имеет логнормальное распределение), или значения косвенных показателей заменить найденными функциями.

5.28. Многомерные уравнения регрессии, полученные на материале Тюменского и Томского Приобья, приведены в табл. 16. Сравнение множественных коэффициентов корреляции показывает, как изменяется теснота связей при последовательном введении каждого нового показателя.

Таблица 16

Вид зависимости	Множественный коэффициент корреляции R
1. $\lg E = 0{,}676 + 0{,}66 \rho_d$	0,59
2. $\lg E = 0{,}815 + 0{,}552 \rho_d - 0{,}0024 C_{opr}$	0,60
3. $\lg E = 0{,}602 + 0{,}694 \rho_d - 0{,}0055 C_{opr} + 0{,}0014 W_T$	0,62
4. $\lg E = 1{,}496 + 0{,}584 \rho_d - 0{,}0084 C_{opr} + 0{,}0019 W - 0{,}876 S_r$	0,64
5. $\lg E = 1{,}429 + 0{,}553 \rho_d - 0{,}0066 C_{opr} + 0{,}0022 W_T - 0{,}731 S_r - 0{,}0012 W$	0,65
6. $E = -3{,}929 + 48{,}816 \frac{1}{e}$	0,65
7. $E = 57{,}23 + 40{,}813 \frac{1}{e} - 61{,}75 S_r$	0,71
8. $E = 57{,}651 + 31{,}357 \frac{1}{e} - 62{,}343 S_r + 59{,}887 \frac{1}{C_{opr}}$	0,72

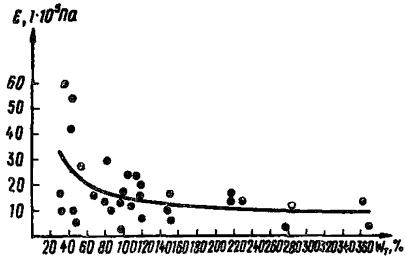


Рис.17. Зависимость модуля деформации от предела текучести органо-минеральных грунтов

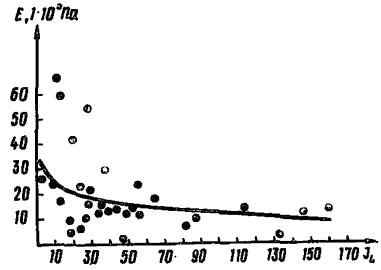


Рис.18. Зависимость модуля деформации E от числа пластичности J_L органо-минеральных грунтов

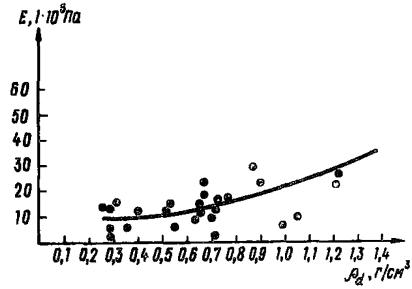


Рис.19. Зависимость модуля деформации E от плотности сухого грунта ρ_d органо-минеральных грунтов

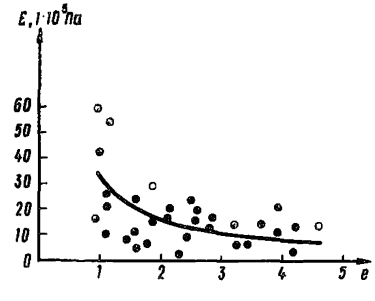


Рис.20. Зависимость модуля деформации E от коэффициента пористости e органо-минеральных грунтов

5.29. Данные табл. 16 подтверждают результаты изучения парных зависимостей. Наиболее информативными характеристиками для прогноза модуля деформации органо-минеральных грунтов следует считать объемную массу скелета (или коэффициент пористости), содержание органического вещества, степень влажности и предел текучести (рис. 17–20).

5.30. Использование комплекса косвенных показателей позволяет несколько повысить тесноту связей, что сказывается на величине коэффициента корреляции. Оптимальный набор показателей для прогноза модуля деформации органо-минеральных водонасыщенных грунтов представлен в уравнении поз. 8 (табл. 16).

Максимальное значение множественного коэффициента корреляции составило 0,72.

ПРОГНОЗ ИЗМЕНЕНИЯ ДЕФОРМАЦИОННЫХ И ПРОЧНОСТНЫХ СВОЙСТВ ОРГАНО-МИНЕРАЛЬНЫХ ГРУНТОВ ПРИ ИХ ВОДОНАСЫЩЕНИИ

5.31. Наличие результатов параллельных определений деформационных и прочностных характеристик органо-минеральных грунтов дает возможность осуществить прогноз изменения этих свойств под влиянием дополнительного естественного и искусственного увлажнения.

5.32. Данные компрессионных и сдвиговых испытаний, используемые для прогноза, должны быть получены на двух параллельных образцах, вырезанных из одного и того же монолита. Испытания должны быть выполнены по единой методике, на одних и тех же приборах.

5.33. По данным параллельных испытаний строятся точечные графики зависимости между значениями показателей, полученными для грунтов, взятых при естественной влажности, и после их дополнительного замачивания. Пример такого графика приведен на рис. 21.

5.34. Для описания полученных зависимостей может быть использована программа ГРАФИК (см. п.5.12). Если расположение точек свидетельствует о наличии линейной зависимости, может быть использована любая программа парной линейной регрессии, дающая оценку точности выдаваемой аппроксимации.

5.35. Опыт показывает, что обработку данных для неводонасыщенных в естественном состоянии грунтов ($S_r < 0{,}8$) и водонасыщенных разностей ($S_r \geqslant 0{,}8$) следует производить отдельно, так как они по-разному реагируют на дополнительное замачивание.

5.36. Примеры регрессионных уравнений, позволяющих ориентировочно прогнозировать деформационные и прочностные свойства неводонасыщенных органо-минеральных грунтов Приобья (E, φ, C) после их замачивания, приведены в табл. 17.

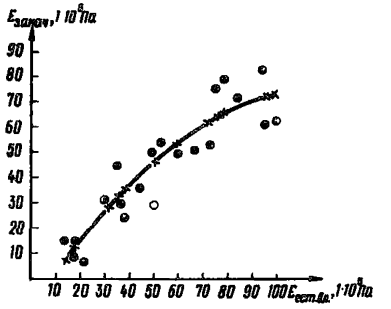


Рис.21. Зависимость модуля деформации E органо-минеральных грунтов при естественной влажности и в состоянии полного водонасыщения

Таблица 17

Вид зависимости	$s_y / \hat{s}$	R
$E_{зам} = -0{,}006\, E^2_{ест.вл} + 1{,}46\, E_{ест.вл} - 11{,}85$	$\frac{23{,}5}{10{,}1}$	0,90
$\varphi_{зам} = 0{,}955\, \varphi_{ест.вл} + 2{,}152$	$\frac{5{,}8}{4{,}7}$	0,61
$C_{зам} = 0{,}148\, lg\, C_{ест.вл} + 0{,}181$	$\frac{0{,}034}{0{,}025}$	0,82

5.37. Экзамен выведенных зависимостей показал удовлетворительное качество прогноза по всем показателям. Наиболее точный прогноз может быть получен для модуля деформации (коэффициент корреляции 0,9).

5.38. Приближенная оценка деформационных и прочностных характеристик грунтов при их замачивании на основе регрессионного анализа по данным испытаний образцов естественной влажности позволяет сократить объем полевых и лабораторных исследований (в особенности при изысканиях для сооружений III–IУ класса капитальности), а также более обоснованно планировать инженерно-геологическое опробование на поздних стадиях изысканий.

6. ОЦЕНКА ИЗМЕНЕНИЯ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ГРУНТОВ ПРИ ИХ ПОДТОПЛЕНИИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМ МЕТОДОМ

6.1. На современном этапе с помощью расчетного метода можно получить лишь ориентировочную оценку изменения состава и физико-механических характеристик грунтов в ожидаемых при строительстве условиях. Для прямого определения прогнозных значений расчетных показателей следует применять способ экспериментального моделирования, который заключается в проведении испытаний физико-механических свойств в искусственно созданных условиях, воспроизводящих состояние и обстановку, в которой будет находиться грунт на площадке изысканий в заданный момент времени.

6.2. Исследования в целях оценки и прогнозирования инженерно-геологических свойств грунтов при неблагоприятных изменениях влажности (в условиях подтопления территории или обводнения их поверхностными водами) должны включать: всестороннее комплексное изучение вещественного состава, дисперсности, водно-физических и механических свойств грунтов в природном состоянии; экспериментальное моделирование процес-

сов обводнения грунтов в установленных заданием условиях увлажнения и напряженного состояния.

6.3. Для постановки модельных экспериментов могут быть применены полевые и лабораторные методы исследования. Преимуществом лабораторного моделирования является возможность изучения ожидаемых процессов с учетом пространственной изменчивости грунтов, фактора времени, напряженного состояния и т.п. Эти методы обеспечивают получение материалов в объеме, необходимом для статистической обработки данных с целью выявления корреляционных зависимостей между изменениями влажностного режима грунтов и их механическими свойствами.

При использовании преимущественно стандартного оборудования, методом лабораторного моделирования могут быть изучены следующие вопросы),

а) Исследована природа физико-химических процессов, возникающих в грунтах при их взаимодействии с природными водами, хозяйственными стоками: изменение минерального и дисперсного состава твердой фазы грунтов, их ионно-солевого состава и окислительно-восстановительного режима, выщелачивание (диффузионное или фильтрационное), засоление и т.п. Получена количественная оценка влияния этих процессов на физико-механические свойства грунтов.

б) Установлены и изучены неблагоприятные явления, проявляющиеся в грунтах при их обводнении: набухание, просадочность, механическая и химическая суффозия, плывунность и др.

в) Выявлены закономерности изменения прочностных и деформационных свойств грунтов при неблагоприятных изменениях их влажностного режима и получены прогнозные значения характеристик этих свойств после развития процессов подтопления на застроенных и незастроенных участках.

г) При использовании специального оборудования может быть исследовано влияние гидродинамических и гидростатических факторов на напряженное состояние грунтов, а также на деформационное поведение этих пород при особом характере механических воздействий (вибрационных, повторных статических и т.п).

6.4. Исследования вещественного состава, водно-физических и механических свойств структурно-неустойчивых грунтов должны проводиться с учетом специфических особенностей отдельных классификационных групп. При этом особое внимание должно быть уделено изучению тех свойств, которые будут претерпевать наиболее существенные изменения или оказывать значительное влияние на поведение грунтов в прогнозируемых условиях увлажнения при намечаемых видах освоения территорий.

При проведении модельных опытов должны учитываться:

состояние грунтов по плотности и влажности к моменту их обводнения;

условия напряженного состояния, в которых будут находиться грунты на территории изысканий при развитии процессов подтопления, и характер испытываемых ими механических воздействий;

химический состав взаимодействующих с грунтами вод.

6.5. Предназначенные для лабораторных исследований образцы ненарушенной структуры и влажности отбирают из горных выработок или скважин с учетом требований главы СНиП по проектированию зданий и сооружений, ГОСТ 20522–75 и СН 225-79, а также состава комплексных исследований и моделирования.

Отобранные монолиты должны характеризовать типичные литолого-фациальные типы поверхностных отложений осваиваемой территории и отражать пространственную изменчивость показателей строительных свойств грунтов, распространенных на участках с различными условиями увлажнения и дренирования.

При наличии вблизи площадки изысканий ранее подтопленных территорий с близкими инженерно-геологическими условиями необходимо предусмотреть опробование характерных типов грунтов и на этих территориях.

Образцы торфов, слабоуплотненных водонасыщенных глинистых и пылеватых грунтов, а также лессов следует отбирать в металлические обоймы или в парафинированные гильзы с помощью тонкостенных грунтоносов.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЕЩЕСТВЕННОГО СОСТАВА ГРУНТОВ

6.6. Вещественный состав является одним из главных факторов, определяющих особенности структуры и физико-механических свойств грунтов, а также характер и интенсивность их изменения при обводнении территорий поверхностными, грунтовыми водами или стоками промышленных предприятий.

Результаты исследования состава выявляют наличие в грунтах растворимых или нестойких по отношению к выветриванию компонентов, позволяют оценить коррозионные и агрессивные свойства грунтов и взаимодействующих с ними вод, определить гидрофильность высокодисперсных компонентов, а также характер и водоустойчивость структурных связей.

Данные по составу грунтов необходимы для предварительного прогноза ожидаемых при обводнении процессов и являются основой для рационального планирования исследований инженерно-геологических свойств грунтов и экспериментального моделирования.

6.7. В зависимости от этапа изысканий и целевых задач исследований изучение химико-минерального состава грунтов следует проводить по полному или сокращенному комплексу:

по полному комплексу – для оценки состава пород ранее не изученных территорий, для ориентировочного прогноза процессов, которые могут произойти в грунтах при подтоплении или под влиянием других антропогенных процессов, при выполнении экспериментального моделирования этих процессов;

по сокращенному комплексу – при работах на территориях, для которых состав грунтов хорошо изучен, при решении частных задач, для оценки изменения состава некоторых компонентов (например, ионно-солевого комплекса грунтов до и после лабораторных экспериментов).

6.8. Состав полного комплекса для различных литологических типов грунтов приведен в табл. 18.

Состав сокращенного комплекса назначается в зависимости от целей исследований. В обязательном порядке они должны включать:

Таблица 18

Определения	Грунты			
	органогенные	органо-минеральные	глинистые	пылеватые
1. Общая характеристика минералогического состава по данным изучения породы в шлифе	+	+	+	+
2. Состав обломочных минералов	–	–	+	+
3. Минералогический состав фракций < 0,001 мм	–	п	+	+
4. Содержание органического вещества	+	+	+	+
5. Степень разложения растительных остатков (в торфах)	+	–	–	–
6. Групповой состав органического вещества	п	п	п	п
7. Аморфная SiO_2 (щелочная вытяжка)	–	п	+	+
8. Подвижные формы R_2O_3 (вытяжка Тамма)	–	п	п	п
9. Формы реакционноспособного железа Fe^{2+} и Fe^{3+}	–	п	п	п
10. Содержание CO_2 карбонатов	п	+	+	+
11. Содержание и состав среднерастворимых солей (солянокислая вытяжка)	–	п	п	п
12. Содержание и состав водорастворимых солей (анализ водной вытяжки и поровых растворов)	п	+	+	+
13. Емкость обмена	–	п	п	п
14. Состав обменных катионов в поглощающем комплексе	п	+	+	+

Примечание. – – анализ не выполняется;
+ – анализ выполняется;
п – анализ по специальному заданию.

для некарбонатных и незасоленных грунтов — определение органического вещества, pH водной суспензии или водной вытяжки, содержание водно-растворимых веществ по плотному остатку;

для карбонатных грунтов дополнительно определяют CO_2 карбонатов и состав солянокислых вытяжек.

Во всех случаях приводится полный химический анализ взаимодействующих с грунтами вод.

6.9. Определение минералогического состава породообразующих минералов следует проводить по фракциям в специализированных лабораториях с применением комплекса современных методов, включающих: изучение породы в шлифе; определение состава пылеватых и песчаных частиц иммерсионным методом; изучение состава глинистых минералов рентгеновским методом, электронно-микроскопическим и термическим.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОРГАНИЧЕСКИХ ВЕЩЕСТВ

6.10. Для оценки присутствующих в грунтах органических веществ ОВ определяют их общее содержание и групповой состав. В торфах и грубодетритовых сапропелях дополнительно исследуют степень разложения растительных остатков и зольность.

6.11. Результаты определения состава и содержания ОВ используют:

как номенклатурный критерий в соответствии с требованиями главы СНиП II-15-74;

для предварительной оценки структурных особенностей органо-минеральных и органических грунтов и их поведения при обводнении;

при разделении материала, предназначенного для обработки на ЭВМ, на статистические совокупности;

для оценки коррозионных свойств грунтов.

6.12. Определение органических веществ производится по ГОСТ 23740–79 с учетом следующих добавлений.

а) Определение количества неразложившихся растительных остатков следует выполнять только в грубодетритовых сапропелях и в торфах, включая и погребенные разновидности, исследуя их степень разложения.

В илах, сапропелях и органо-минеральных грунтах, обычно относящихся к морским, озерным и лиманным отложениям, это определение проводить нецелесообразно вследствие высокой степени разложения органического вещества, содержащегося в этих породах, и незначительного количества растительного детрита.

б) Включенный в ГОСТ оксидометрический метод обеспечивает наибольшую производительность труда при наименьших

затратах на реактивы и электроэнергию, для его выполнения не требуется специальная аппаратура и предварительное разрушение карбонатов в анализируемой пробе. Поэтому его рекомендуется применять во всех случаях, кроме анализа грунтов, указанных в ГОСТ 23740–79.

в) Метод сухого сжигания, несмотря на его универсальность, менее эффективен. Этот способ рекомендуется применять для некарбонатных разновидностей пород, грунтов с содержанием органических веществ >15 %, а также в тех случаях, когда метод Тюрина неприменим.

6.13. Определение группового состава органического вещества необходимо для оценки коррозионных свойств грунтов и при выявлении его роли в формировании их физико-механических свойств. В связи с тем, что в имеющихся руководствах методика этого анализа не приведена, ниже дан ускоренный способ, рекомендуемый для применения при инженерно-геологических исследованиях.

УСКОРЕННЫЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ГРУППОВОГО СОСТАВА ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА ПО МОДИФИКАЦИИ КОНОНОВОЙ И БЕЛЬЧИКОВОЙ

6.14. Метод заключается в выделении гумусовых веществ из грунта действием раствора пирофосфата натрия и основан на способности этого реагента к образованию нерастворимых соединений с кальцием, алюминием, железом и другими поливалентными катионами, с которыми связаны в грунтах гуминовые кислоты и фульвокислоты.

Из воздушно-сухого грунта, с предварительно отобранными корешками и растительными остатками, берут две навески по 5 г. В одной навеске определяют общее содержание органического углерода по ГОСТ 23740–79, в другой – производят определение группового состава органического вещества.

Для извлечения гумусовых веществ из грунта навеску 5 г помещают в коническую колбу емкостью 250 мл и заливают в конце рабочего дня 100 мл свежеприготовленной смеси пирофосфата натрия и $NaOH$. Колбу закрывают резиновой пробкой и ее содержимое тщательно перемешивают, после чего оставляют до утра. Утром после взбалтывания содержимое колбы переносят на воронку с фильтром (белая лента), вставленным в конус из плотного фильтра с синей обмоткой. При фильтровании мутных растворов их переносят обратно на фильтры с грунтом и повторно пропускают через них. Прозрачные растворы собирают в приемную колбу. Остаток грунта на фильтре после окончания фильтрования вытяжки отбрасывают. В вытяжке определяют общее количество органического углерода и содержание углерода гуминовых кислот.

Количество вытяжки, необходимое для определения $C_{орг}$, определяется по интенсивности ее окраски. Из темноокрашен-

ных вытяжек берут 2–5 мл, в случае слабо окрашенных 10–15 мл. Отобранную пипеткой аликвотную часть вытяжки переносят в коническую колбу емкостью 200 мл и нейтрализуют, прибавляя по каплям 1н H_2SO_4 до появления в растворе легкой мути, после чего ставят колбу на водяную баню и выпаривают ее содержимое досуха. Затем в этой колбе производят определение органического углерода по методу Тюрина, добавляя в колбу для равномерного кипения жидкости 0,5 г прокаленной и растертой пемзы.

Титрование 0,1н раствором соли Мора проводят в той же колбе, предварительно добавив в нее 5–10 мл дистиллированной воды. Определение органического углерода в вытяжке необходимо проводить не менее чем с двухкратной повторностью.

Для определения содержания углерода гуминовых кислот аликвотную часть исходной вытяжки (25 мл в случае сильно окрашенной вытяжки и 40–50 при ее средней и слабой окраске) переносят в стакан емкостью 50–100 мл. Туда же по каплям, при перемешивании стеклянной палочкой, прибавляют для коагуляции гуминовых кислот H_2SO_4 удельного веса 1,84 до появления мути в растворе (избытка кислоты следует избегать).

После тщательного перемешивания содержимого стакана, последний ставят на горячую электрошлитку (обязательно прикрытую асбестом) и ведут нагревание в течение 30 мин при температуре не выше 80°С. Затем стакан снимают с плитки и оставляют при комнатной температуре на ночь для полного осаждения геля гуминовых кислот. Утром раствор фильтруют на маленьких воронках через фильтр с синей обмоткой диаметром 7 см, предварительно смоченный 0,05н раствором H_2SO_4. Сначала на фильтр сливают прозрачный раствор, а потом осадок гуминовой кислоты. Осадок на фильтре промывают холодным раствором 0,05н H_2SO_4 до бесцветного фильтрата (в начале промывания он бывает окрашен фульвокислотами в желтый цвет). После окончания промывки воронку с фильтром и осадком гуминовых кислот переносят на горлышко мерной колбы емкостью 25–100 мл и приступают к растворению осадка 0,05н рствором $NaOH$. Обработку осадка щелочью ведут до полного растворения геля гуминовой кислоты, о чем свидетельствует полное исчезновение окраски фильтрата. Раствор гумата Na в мерной колбе охлаждают при комнатной температуре, после чего его объем доводят до метки, приливая дистиллированную воду.

Для определения углерода гуминовых кислот из мерной колбы берут пипеткой 5–10–20 мл раствора (в зависимости от интенсивности его окраски), переносят его в коническую колбу соответствующей емкости и определяют содержание углерода так же, как и при определении его в исходной вытяжке. Содержание C гуминовых кислот вычисляют в % к массе грунта,

высушенного при 105°С и к общему содержанию органического углерода в грунте.

Количество С фульвокислот (правильнее, смеси растворимых органических веществ, оставшихся в кислом растворе после осаждения гуминовых кислот) определяют по разности между общим содержанием органического углерода в вытяжке и его содержанием в гуминовых кислотах.

Количество углерода в нерастворимой части органического вещества (С нерастворимого осадка) определяют по разности между содержанием $C_{орг}$ в грунте и в вытяжке.

Анализ группового состава гумуса по описанной схеме может быть дополнен определениями из отдельных навесок. Практический интерес представляют: определение свободных или связанных с подвижными формами R_2O_3 гуминовых кислот по методу В. В. Пономаревой; определение органических веществ, переходящих в раствор при обработке грунта 0,1н H_2SO_4.

Примечание. Определение группового состава органического вещества имеет первостепенное значение для оценки коррозионной активности природных вод, органо-минеральных и органогенных грунтов. Экспериментальные исследования, выполненные в НИИЖБ, по изучению природы агрессивности грунтовых и болотных вод Среднего Приобья показали, что эти воды являются агрессивными по отношению к железобетонным конструкциям по бикарбонатной щелочности (выщелачивающая агрессивность) и по водородному показателю (общекислотная агрессивность). При этом было установлено, что ведущим признаком является общекислотная агрессивность, обусловленная присутствием в этих водах сильнодействующих фульвокислот и гуминовых кислот, концентрация которых по существу определяет скорость разрушения цементного камня.

6.15. На формирование структурных связей в слаболитифицированных грунтах оказывают влияние вещества, обладающие способностью при достаточно высоких концентрациях к межмолекулярному взаимодействию с образованием в объеме осадка химических связей. К последним относятся аморфные и плохо окристаллизованные соединения гидроокисей железа и алюминия, а также аморфная кремнекислота, относящиеся по современным представлениям к неорганическим полимерам*.

6.16. Определение подвижной кремнекислоты рекомендуется проводить по методу Гедройца в щелочной вытяжке. Метод основан на образовании растворимых соединений SiO_2 и Al_2O_3 при взаимодействии с 5 % раствором KOH. В вытяжке определяют SiO_2 и Al_2O_3. Количество аморфной кремнекислоты вычисляют по разности между ее общим содержанием в вытяжке и эквивалентным количеством, отвечающим формуле каолина $2SiO_2 \cdot Al_2O_3$.

---

* Исследования, выполненные в Сибирском филиале ПНИИИС, показали, что поверхностные отложения Приобья часто содержат повышенные концентрации перечисленных соединений, поэтому определение этих компонентов следует включать в состав лабораторных исследований.

6.17. Влияние на структуру грунтов подвижных окислов железа, в том числе и их органо-минеральных производных, зависит от валентности присутствующих в грунтах минералогических форм Fe. Соединения окисного железа способствуют образованию в грунтах цементационных связей, устойчивых в условиях окислительной среды, но разрушающихся под влиянием восстановительных процессов. Поэтому для оценки влияния неокристаллизованных форм железа на структуру грунтов следует определять его общее содержание, а также раздельное содержание подвижных форм закисного и окисного Fe.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РЕАКЦИОННОСПОСОБНЫХ ФОРМ ЖЕЛЕЗА В 3,5 н РАСТВОРЕ H_2SO_4

6.18. Метод заключается в растворении аморфных и слабо окристаллизованных форм окисного и закисного железа 3,5н раствором H_2SO_4 на холоду в среде, насыщенной углекислотой, с последующим определением в вытяжке ионов Fe^{2+}, Fe^{3+}.

Определение ведут в пробах грунтов с естественной влажностью отобранных из герметически упакованных монолитов в момент их вскрытия или из образцов нарушенного сложения, но сохранивших природную влажность. Такие образцы отбираются непосредственно в поле в специально изготовленные стеклянные трубки. Заполнение трубок грунтом должно вестись без пузырьков воздуха, после чего их плотно закрывают резиновой пробкой, которую тщательно парафинируют.

Данный метод разработан в Институте океанологии им. П.П. Ширшова АН СССР. В результате экспериментальной проверки была найдена оптимальная концентрация серной кислоты, растворяющей в отсутствие нагревания только железо гидроокислов и частично слабо окристаллизованных железистых минералов (биотита, монтмориллонита, глаутита) и не затрагивающая кристаллические формы этих элементов, силикаты и органическое вещество.

Навеска грунта 200 г с естественной влажностью взвешивается на технических весах на стекле размером 50х23 мм или на кусочке полиэтиленовой пленки. Вместе со стеклом ее помещают в широкогорлую коническую колбу емкостью 100 мл, предварительно заполненную CO_2, и приливают 30 мл 3,5 н H_2SO_4. При анализе осадков, содержащих сульфиды, в колбу перед внесением навески приливают 2 мл 4%-ного раствора сернокислой ртути. Колбу с суспензией закрывают до полного смыва навески со стеклышка и равномерного ее распределения в растворе и оставляют стоять 2 ч, время от времени взбалтывая содержимое колбы.

Заполнение колбы углекислотой производится за счет выделения CO_2 из углекислого натрия, для чего перед анализом в

колбу вносят 0,5—1 г Na_2CO_3 и туда же приливают 5 мл 3,5 н H_2SO_4.

Через 2 ч содержимое колбы быстро переносят в мерную колбу вместимостью 100 мл, заполненную CO_2 способом, отмеченным выше, доводят до метки и оставляют отстаиваться еще 2 ч. Из полученного раствора берут аликвотные части в конические колбы на 100 мл для определения Fe^{2+} и Fe^{3+}, стараясь не взмучивать осадок.

Двухвалентное железо в сернокислой вытяжке определяют бихроматным методом. К аликвотной части исходной вытяжки (25 мл) прибавляют 15 мл смеси Кнопа, 1 каплю дифениламиносульфата натрия и титруют 0,02н $K_2Cr_2O_7$ до появления устойчивой синей окраски. Один миллилитр 0,02н $K_2Cr_2O_7$ соответствует 0,001117 г Fe.

Трехвалентное железо определяют иодометрическим методом. К раствору, отобранному в колбу с притертой пробкой, приливают 5 мл HCl (1:10) и добавляют около 3 г иодистого калия. Колбу закрывают, перемешивают и оставляют в темном месте на 20 мин. Затем обмывают пробку и стенки колбы водой и оттитровывают 0,02н раствором тиосульфата натрия $Na_2S_2O_3$. Сначала титрование ведут до ослабления окраски от коричневого до бледно-желтого цвета. Затем добавляют крахмал и продолжают титрование до полного исчезновения синей окраски. Один миллилитр 0,02н раствора $Na_2S_2O_3$ соответствует 0,001117 г Fe. Содержание Fe^{3+} рассчитывают так же, как и в предыдущем случае, но с учетом коэффициента на нормальность $Na_2S_2O_3$, так как титр раствора тиосульфата в отличие от титра бихромата калия неустойчив.

Приготовление реактивов:

Серная кислота 3,5н. 100 мл концентрированной H_2SO_4 вливают в 900 мл воды. После остывания раствор доводят до 1 л.

Раствор соли Мора 0,05н. К 500 мл воды приливают 200 мл концентрированной H_2SO_4 и сразу в горячий раствор всыпают 40 г отвешенной на технических весах соли Мора. В случае если раствор не полностью прозрачен, его слегка нагревают на плитке до полного исчезновения мути. По охлаждении объем раствора доводят до 2 л и перемешивают. Хранят в стеклянной колбе с хорошо пришлифованной пробкой.

Раствор $K_2Cr_2O_7$ 0,02н может быть получен из 0,1н раствора этой соли, приготовленного из фиксанала или точной навески с последующим разбавлением его в 5 раз (титр раствора бихромата калия устойчив).

Раствор $Na_2S_2O_3$ 0,02н. Первоначально из фиксанала или навески этой соли (25 г на 1 л) готовят 0,1н раствор, используя воду, лишенную CO_2. Приготовленный раствор оставляют в темном месте на 5—10 дней, после чего пятикратным его разбавлением водой без CO_2 готовят 0,02н раствор, при этом для кон-

сервации прибавляют по 2 мл хлороформа на каждый литр раствора. Затем ему дают выстояться в течение двух недель в темном месте, после чего устанавливают его нормальность по 0,02н раствору $K_2Cr_2O_7$. Для этого в колбы емкостью 250 мл с пришлифованными пробками приливают 10 мл 3,5н H_2SO_4, 20 мл 0,02 н $K_2Cr_2O_4$ и прибавляют 0,5 г иодистого калия. Колбы закрывают пробками, выдерживают в темном месте 10–15 мин, а затем, после отмывания пробки и стенок колбы дистиллированной водой, титруют тиосульфатом Na. При ослаблении окраски до светло-желтой добавляют крахмал и заканчивают титрование, прибавляя тиосульфат по каплям, каждый раз хорошо перемешивая, до перехода синей окраски в светло-зеленую от ионов Cr^{3+}. Чтобы проверить, не перетитрован ли раствор, к нему прибавляют одну каплю 0,02н $K_2Cr_2O_7$, при этом должно вновь появиться устойчивое синее окрашивание. Из 3–4 сходящихся результатов берут среднее и вычисляют коэффициент к нормальности.

Раствор крахмала 1%-ный. 1 г крахмала размешивают с 2–3 мл воды и медленно вливают полученную кашицу в 100 мл кипящей смеси, состоящей из 50 мл глицерина и 50 мл воды, и кипятят еще 2–3 мин. Раствор можно применять в течение нескольких месяцев. При титровании добавляют 2–3 мл крахмала. Таким же образом можно готовить раствор крахмала и без глицерина, но в этом случае пригодность раствора ограничивается несколькими днями.

Раствор дифениламиносульфата натрия 0,5%-ный. При отсутствии соли натрия раствор готовят из дифениламиносульфата бария. Для этого 1,2 г реактива растворяют в 100 мл горячей воды, добавляют при помешивании 5 г Na_2SO_4, кипятят несколько минут, после отстаивания отфильтровывают выпавший осадок сульфата Ba. 1 капля индикатора на 40–50 мл титруемого раствора обеспечивает четкий переход.

Смесь Кноппа. 150 мл конц. H_2SO_4 вливают в 500 мл воды, после охлаждения добавляют 150 мл конц. H_3PO_4 и доводят водой до 1 л.

Раствор сернокислой ртути 4%-ный. 3 г окиси ртути растворяют в 10 мл H_2SO_4 (1:1). Раствор взбалтывают и доводят водой до 100 мл. При необходимости фильтруют.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОСТАВА СОЛЕЙ

6.19. При исследовании грунтов, содержащих карбонаты и другие труднорастворимые соли, следует проводить анализ солянокислых вытяжек и определять количество CO_2 карбонатов.

Разложение карбонатного материала рекомендуется выполнять в 2%-ной солянокислой вытяжке при кипячении в течение 5 мин.

В вытяжке определяют SiO_2, Al_2O_3, Fe_2O_3, CaO, MgO, SO_3.

Анализ перечисленных компонентов следует проводить по методике, изложенной в Методическом пособии по инженерно-геологическому изучению горных пород, том 1, М., "Недра", 1968.

6.20. Содержание CO_2 карбонатов рекомендуется определять ацидометрическим методом, основанным на разрушении карбонатов титрованным раствором соляной кислоты при суточном настаивании и последующем титровании избытка кислоты щелочью. Метод дает хорошие результаты независимо от состава карбонатных минералов и пригоден для массовых анализов.

6.21. Определение состава водно-растворимых солей при решении прогнозных задач следует проводить в следующих целях:

а) для определения количества и состава солей, способных к выщелачиванию при длительном взаимодействии грунтов с подземными или фильтрационными водами;

б) для выявления состава агрессивных компонентов в грунтах;

в) для оценки характера структурных связей и прогноза их изменения при обводнении территорий поверхностными или подземными водами.

Состав и содержание солей должны учитываться при формировании массивов экспериментальных данных, предназначенных для статистической обработки.

Водно-растворимые соли определяют из водных вытяжек, приготовленных при соотношении грунта с водой 1:5, с последующим трехминутным взбалтыванием на встряхивающем аппарате. Для вытяжек используется дистиллированная вода, лишенная CO_2. В водной вытяжке определяют pH, общее содержание растворенных веществ по плотному остатку, содержание отдельных ионов: CO_3^{-2}, HCO_3^-, Cl^-, SO_4^{2-}, $HSiO_3^-$, Ca^{2+}, Mg^{2+}, Na^+, K^+, Fe^{2+}, Fe^{3+}, NH_4^+, NO_2^-, NO_3^-, а также количество водно-растворимых органических веществ.

Состав подлежащих анализу компонентов указывается в задании. Методика определения отдельных ионов подробно изложена в ряде руководств и пособий*, которые следует применять с учетом дополнений, приведенных ниже.

1. Суммарную концентрацию ионов Na^+ и K^+ обычно определяют по разности между суммой анионов и суммой Ca^{2+} и Mg^{2+}, так как прямое определение щелочных катионов химическими методами занимает много времени и требует применения дефицитных реактивов. Однако для грунтов Западной Сибири и некоторых других регионов такой способ дает недостоверные ре-

---

* Руководство по химическому анализу почв. М., изд. МГУ, 1970. Методическое пособие по инженерно-геологическому изучению горных пород, том 1. М., изд. МГУ, 1968.

зультаты, так как в водных вытяжках этих пород присутствуют соединения, определение которых не предусматривается стандартной схемой анализа (например, Fe^{2+}, Fe^{3+}, $HSiO_3^-$ и др.) и поэтому их содержание не учитывается при расчетах. Кроме того, у грунтов, в составе которых преобладают соединения K^+ или Na^+, прочностные и деформационные свойства при обводнении меняются по-разному. Поэтому для достоверной оценки содержания и состава одновалентных катионов требуется их прямое определение, которое рекомендуется проводить пламенно-фотометрическим методом. При отсутствии в лабораториях проектно-изыскательских организаций пламенного фотометра эти анализы следует передавать в специально оборудованные лаборатории.

2. При анализе водных вытяжек органических и органо-минеральных грунтов необходимо определять содержание водорастворимых органических соединений по величине бихроматной окисляемости.

3. В грунтах с кислой реакцией среды определяют следующие виды кислотности: общую (суммарную) от свободной углекислоты, органических кислот и ненасыщенных соединений, отдельно – от органических кислот и от свободной CO_2.

6.22. Для изучения состава жидкой фазы грунтов проводят анализ выделенных из них поровых вод.

Для получения поровых растворов из глинистых, органо-минеральных и органических грунтов рекомендуется метод прессования с применениями пресс-форм конструкции Крюкова.

Выделение растворов из пылеватых легких глин, суглинков и супесей целесообразно выполнять спиртовым методом, проводя вытеснение в специально изготовленных полиэтиленовых трубках по методу Крюкова–Комаровой.

В поровых водах некарбонатных грунтов определяют CO_3^{2-}, HCO_3^-, Cl^-, SO_4^{2-}, $HSiO_3^-$, Ca^{2+}, Mg^{2+}, Na^+, K^+, Fe^{2+}, Fe^{3+} и содержание растворимых органических веществ (определение $HSiO_3^-$, Fe^{3+}, Fe^{2+}, Al^{3+} выполняется по специальному заданию).

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КАТИОНООБМЕННОЙ СПОСОБНОСТИ ГРУНТОВ

6.23. Обменная способность и состав поглощенных катионов определяют коллоидную активность, гидрофильность и структурообразующую способность высокодисперсных составляющих грунтов и оказывают наиболее существенное влияние на поведение последних при взаимодействии с природными водами и промстоками.

Емкость обмена количественно характеризует обменную способность грунтов, т.е. общее содержание ионов, находящихся в обменной форме, и зависит от состава высокодисперсных частиц и химического состава жидкой фазы пород.

Величину емкости обмена определяют для косвенной оценки минералогического состава фракций – 1 мкм и их коллоидной

активности. При изменении состава и агрегатного состояния в грунтах, подверженных воздействию различных антропогенных и природных факторов, изменение величины емкости обмена является важным показателем общего изменения инженерно-геологических свойств этих грунтов.

6.24. Для определения емкости обмена разработаны методы, обладающие большой точностью, и экспресс-методы. Наилучшие результаты, с высокой воспроизводимостью, получают при определении емкости обмена по методу Бобко—Аскинази в модификации Грабарова и Уваровой.

6.25. При выборе методики определения состава поглощенных катионов проводят предварительные испытания в анализируемых образцах на концентрацию водородных ионов pH, карбонатность, гипсоносность и состав водорастворимых солей.

В грунтах с кислой и нейтральной реакцией среды определяют: H^+, Ca^{2+}, Mg^{2+}, Al^{3+}, Na^+ и K^+. При щелочной реакции — ионы Ca^{2+}, Mg^{2+}, Na^+ и K^+.

В некарбонатных образцах определение поглощенных катионов Ca^{2+}, Mg^{2+}, Na^+, K^+ проводят по методам Гедройца с применением в качестве вытеснителя 1,0н раствора NH_4Cl или по методу Шолленбергера с использованием для выделения этих же катионов 1,0н раствора CH_3COONH_4. Применение в качестве вытеснителя ацетата аммония имеет то преимущество, что этот реактив не оказывает заметного разрушающего действия на минеральную часть грунтов, поэтому полученная вытяжка не содержит полуторных окислов и других соединений, мешающих определению Ca^{2+} и Mg^{2+}. Для определения в полученных обоими методами вытяжках Ca^{2+} и Mg^{2+} используют комплексонометрический метод, а натрий и калий определяют пламенным фотометром. В кислых грунтах дополнительно исследуют содержание обменного водорода по методу Гедройца и подвижного алюминия по методу Соколова.

Состав обменных катионов в грунтах, содержащих карбонаты, а также в породах сульфитного и хлоридно-сульфатного засоления рекомендуется определять по ускоренному методу Пфеффера в модификации В.А. Молодцова и В.П. Игнатовой. Так как этот метод является сравнительно новым и не вошел в имеющиеся руководства по химическому анализу почв и грунтов, приводим его краткое описание.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОБМЕННЫХ КАТИОНОВ ПО МЕТОДУ ПФЕФФЕРА В МОДИФИКАЦИИ МОЛОДЦОВА И ИГНАТОВОЙ

6.26. Метод заключается в предварительном удалении солей из грунта без изменения состава поглощенных катионов, путем перевода их из твердой фазы в поровый раствор с последующей отмывкой 70%-ным спиртом. Для растворения солей к навеске

воздушно-сухого грунта приливают объем воды, составляющий 20–40 % от его массы. Выполненные авторами контрольные исследования показали, что при таком увлажнении грунта состав обменных катионов не меняется.

К навеске воздушно-сухой пробы, помещенной в коническую колбу емкостью 100 мл, приливают дистиллированную воду в количестве, необходимом для увлажнения грунта до состояния полной влагоемкости. Колбу закрывают пробкой и оставляют на ночь. На следующий день проводят отмывку солей 70%-ным этиловым спиртом. Для ускорения хода анализа целесообразно использовать центрифугу. При этом увлажненный грунт переносят в центрифужную полиэтиленовую пробирку емкостью 100 мл. Затем приливают в пробирку 10–15 мл спирта, содержимое перемешивают и потом центрифугируют в течение 10 мин при 2 тыс.об/мин. После чего отстой жидкости из пробирки удаляют. Такой прием повторяют несколько раз до исчезновения в отстое реакции на SO_4.

После отмывки солей производят вытеснение поглощенных катионов реактивом Пфеффера (0,1 н раствор NH_4Cl в 70%-ном спирте при pH 7,0; значение pH до нужного уровня доводят 10%-ным раствором NH_4OH). Для этого в центрифужные пробирки вносят по 25 мл реактива Пфеффера, перемешивают суспензию стеклянной палочкой и оставляют на 1 ч. Затем суспензию центрифугируют в течение 10 мин при оборотах, указанных выше. Осветленную жидкость переносят в фарфоровые чашки и выпаривают на водяной бане. Такую операцию проводят еще 3 раза, но время взаимодействия реактива Пфеффера с грунтом сокращают до 30 мин. Затем осадок в чашках прокаливают в муфеле при температуре 350–400°С до исчезнования белых паров аммония. Прокаленный осадок растворяют 2–3 каплями концентрированной HCl и горячей водой. Раствор фильтруют в мерные колбы на 200 мл, охлаждают, доводят до метки. В фильтрате определяют: Ca^{2+} и Mg^{2+} комплексометрическим методом, K^+ и Na^+ – пламенным фотометром.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ

6.27. При взаимодействии структурно-неустойчивых грунтов с природными водами или промстоками происходит изменение их физических свойств: влажности, консистенции, плотности и т.п., а также энергии контактных взаимодействий между частицами и агрегатами, что ведет к общему снижению прочности грунтов. Величина дополнительного поглощения влаги зависит от исходной степени влажности грунтов и их способности набухать.

6.28. При водонасыщении до состояния полной влагоемкости ненабухающих грунтов их плотность практически не меня-

ется , но в то же время в зависимости от исходной влажности изменения консистенции могут быть значительными, особенно у слабоуплотненных грунтов.

6.29. После взаимодействия с водой или водными растворами грунтов, обладающих способностью набухать, возникают объемные деформации набухания, в результате которых уменьшается плотность грунтов, увеличивается влажность и изменяется консистенция.

6.30. При развитии процессов, влияющих на минеральный состав грунтов (выщелачивание, оглеение, новообразование минералов и т.п.), кроме изменения состояния пород, происходит изменение и плотности частиц грунта.

6.31. Для оценки изменения плотности и влажности ненабухающих грунтов после их взаимодействия с неагрессивными водами следует определять влажность, плотность и консистенцию этих грунтов в состоянии полной влагоемкости.

Водонасыщение проводят, загружая грунт в рабочее кольцо от сдвигового или компрессионного прибора, а также в приборе ПНГ. Кольцо с грунтом помещают в заполненный водой кристаллизатор. Нижняя часть кольца должна быть закрыта ситом. Уровень воды в начале опыта не должен превышать 1–2 см. После окончания капиллярного насыщения образца кристаллизатор заполняется водой так, чтобы ее уровень был на 1 мм выше уровня грунта в кольце. Водонасыщение заканчивается после достижения образцом постоянной массы.

Величины физических характеристик при заданной степени влажности (например, при 0,8) рассчитываются по формулам:

влажность $$W_{S_r=0,8} = W_e \cdot 0,8 / S_r \ ; \qquad (1)$$

плотность $$\rho_{S_r=0,8} = \rho_d \cdot (1 + W_{S_r=0,8}); \qquad (2)$$

консистенция $$I_{LS_r=0,8} = \frac{0,8 \cdot e \rho_w}{\rho_s} / W_L - W_p \ , \qquad (3)$$

где W_e , W_L , W_p – влажность естественная, на границе текучести и границе раскатывания в долях единицы; ρ_w ; ρ_d ; ρ_s – плотность воды, равная единице, плотность сухого грунта, плотность частиц грунта; e – коэффициент пористости.

6.32. Для прогноза при водонасыщении физических свойств набухающих разновидностей грунтов следует определять: влажность образцов после свободного набухания и соответствующие ей значения объемного веса грунта и консолидации; влажность образцов в условиях набухания под заданными нагрузками.

6.33. Номенклатура характеристик структуры и физических свойств грунтов, подлежащих лабораторному определению, приведена в табл.19.

Таблица 19

Характеристики свойств	Литологический тип грунта			
	глинистый	пылеватый	органо-минеральный	органический
1. Плотность частиц грунта	+	+	+	+
2. Плотность	+	+	+	+
3. Плотность сухого грунта	+	+	+	+
4. Влажность природная	+	+	+	+
5. Пористость	+	+	+	+
6. Коэффициент пористости	+	+	+	+
7. Степень влажности	+	+	+	+
8. Влажность на пределе текучести	+	+	+	–
9. Влажность на пределе раскатывания	+	+	+	–
10. Число пластичности	+	+	+	–
11. Консистенция природная	+	+	+	–
12. Максимальная молекулярная влагоемкость	+	+	+	+
13. Гранулометрический и микроагрегатный состав	+	+	+	–
14. Размокаемость	+	+	+	+
15. Набухание	+	+	+	+
16. Усадка	+	+	+	+

Примечание. + – анализ следует выполнять; – – анализ не выполняется.

6.34. Определение физических характеристик следует проводить по действующим ГОСТам, с учетом некоторых дополнений, учитывающих специфические особенности состава различных типов структурно-неустойчивых грунтов.

Определение плотности частиц грунта пылеватых и глинистых грунтов, а также органо-минеральных разновидностей названных грунтов следует проводить по ГОСТ 5181–78.

Определение плотности частиц торфов и органических сапропелей допускается производить в уплотнителе УВД-3 конструкции Калининского политехнического института.

6.35. Определение плотности грунтов производится по ГОСТ 5182–78 методом режущих колец.

Примечания: 1. Для торфов рекомендуется использовать специально изготовленные кольца, объемом 500–100 $см^3$. 2. Если пробы грунтов для определения плотности отбираются в поле, то кольца должны быть снабжены притертыми крышками.

6.36. Определение влажности грунтов производят весовым методом по ГОСТ 5180–75 с учетом следующих дополнений:

для торфов и органических сапропелей масса сухой пробы грунта должна быть не менее 2–3 г. Для обеспечения этого усло-

вия проба естественновлажного грунта должна составлять 20–30 г;

при работе с монолитами торфов для контроля влажности следует отбирать одну пробу порядка 100 г с целью получения среднего контрольного значения.

6.37. Пределы текучести и раскатывания определяют по ГОСТ 5183–77.

Примечания: 1. При изучении органических грунтов пределы пластичности следует определять только в образцах сильноразложившихся торфов и сапропелей.

2. Определение границ текучести и раскатывания всех разновидностей слаболитифицированных грунтов следует проводить в пробах, сохранивших естественную влажность.

3. Ввиду значительной неоднородности дисперсности аллювиальных и озерно-аллювиальных грунтов, что затрудняет получение представительной средней пробы, для определения границы раскатывания рекомендуется использовать грунтовое тесто, оставшиеся после определения W_L.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДИСПЕРСНОСТИ ГРУНТОВ

6.38. Структурно-неустойчивые грунты различных генетических типов представляют собой полидисперсные образования, состоящие из разных минералов, обломков пород и частиц органических веществ, размер которых изменяется в широких пределах. В естественных условиях первичные частицы могут быть скоагулированы в микроагрегаты, при наличии в обменном комплексе пород поливалентных катионов, или сцементированы воздействием веществ, играющих роль природных цементов. К последним относятся: аморфный кремнезем, окислы железа и алюминия, карбонаты, гипс и органическое вещество.

6.39. В лабораторных условиях для оценки дисперсного состава первичных частиц выполняют гранулометрический анализ, подготовка к которому обеспечивает предельную диспергацию природных агрегатов под влиянием механического и физико-химического воздействия на грунт.

Подготовка к микроагрегатному анализу включает замачивание пробы грунта в течение суток в дистиллированной воде и последующее двухчасовое взбалтывание на встряхивающем аппарате. Данные микроагрегатного анализа отражают содержание водоустойчивых агрегатов.

6.40. При взаимодействии грунтов с неагрессивными по отношению к их твердой фазе природными водами и промстоками гранулометрический состав остается постоянным.

Изменение в соотношении отдельных фракций гранулометрического состава может происходить в следующих случаях:

после длительного взаимодействия карбонатных грунтов с кислыми (например,болотными) водами;

при развитии глееевого процесса в результате разрушения нестойких минералов и трансформации соединений окисного железа (Fe^{3+}) в растворимую закисную форму;

под влиянием щелочных и кислых растворов с концентрацией > 1н, вызывающих растворение окислов железа, алюминия, аморфного кремнезема глинистых и ряда обломочных минералов, а также образование некоторых силикатных соединений под воздействием щелочей.

6.41. Микроагрегатный состав не является постоянным, а претерпевает наиболее существенные изменения в зависимости от процессов, протекающих в грунтах, а также при изменении их влажностного режима. Степень агрегированности дисперсных фракций в условиях обводнения территории может существенно меняться под влиянием следующих факторов.

1. При обводнении территорий природными водами или промстоками, химический состав которых отличается от солевого состава грунтов. При этом в результате нарушения сложившегося ионно-солевого равновесия между катионами в поглощенном состоянии и ионами поровых вод и активизации обменных реакций происходит либо агрегация коллоидных частиц при увеличении в составе обменных катионов содержания H^+, Ca^{2+}, Mg^{2+}, Fe^{3+} и Al^{3+}, либо самопроизвольная диспергация природных агрегатов под влиянием катионов Na^+ и K^+.

2. В результате растворения веществ природных цементов.

3. При осушении грунтов, содержащих органические вещества, за счет образования в условиях окислительной среды необратимых структурных связей между макромолекулами гуминовых веществ.

6.42. Дисперсный состав минеральных и органо-минеральных грунтов при решении прогнозных задач рекомендуется определять методами гранулометрического и микроагрегатного анализов.

При проведении моделирования, в целях получения оценки изменения агрегатного состава грунтов под влиянием воздействующих на них вод, следует проводить сопоставление данных мироагрегатного анализа до и после окончания опытов.

6.43. Определение гранулометрического и микроагрегатного состава глинистых и пылеватых грунтов, а также разновидностей этих пород, содержащих гумифицированное вещество, следует проводить по ГОСТ 12536–79.

Примечание. При исследовании гранулометрического и микроагрегатного состава илов и слабоуплотненных глинистых грунтов, содержащих органические вещества и гидроокислы железа, следует брать образцы с естественной влажностью.

6.44. Дисперсный состав торфов и содержащих растительный детрит сапропелей следует определять комбинированным способом, включающим последовательное применение ситового, пипеточного и электронно-микроскопического методов.

6.45. Для количественной оценки изменения механических свойств грунтов при развитии процессов подтопления и определения прогнозных значений показателей этих свойств в ожидаемой обстановке следует проводить модельные испытания механических свойств грунтов в условиях, воспроизводящих их увлажнение и напряженное состояние на территории изысканий в момент развития этих процессов.

6.46. Экспериментальное моделирование следует проводить для грунтов, слагающих сезонно и потенциально подтопляемые территории, а также для участков, испытывающих прогрессивное заболачивание.

6.47. Количество образцов грунтов и их объем следует устанавливать в программе изысканий для каждого выделенного инженерно-геологического элемента с учетом требования СНиП по проектированию оснований зданий и сооружений, ГОСТ 20522–75 и СН 225-79.

6.48. Для оценки влияния обводнения на прочностные и деформационные свойства грунтов рекомендуется использовать показатель

$$K^{A}_{п.вод} = \left(1 - \frac{A_{п.вод}}{A_{ест}}\right) \cdot 100\%,$$

где $A_{п.вод}$ – любой из показателей механических свойств грунта (E, C, φ), определенный на предварительно водонасыщенном образце; $A_{ест}$ – тот же показатель, определенный на образце с естественной влажностью.

6.49. Для реализации лабораторных экспериментов следует выполнить комплекс работ, включающий:

1. Сбор информации, необходимой для составления общей схемы планирования экспериментов и разработки методики отдельных испытаний;

2. Подготовку к проведению модельных испытаний;

3. Проведение испытаний механических свойств грунтов природного состояния и опытов, моделирующих влияние на грунты процессов обводнения и замачивания.

6.50. На первой стадии исследований должны быть решены следующие задачи:

По результатам гидрогеологических исследований установлены причины и источники обводнения, время критического подъема уровня грунтовых вод, их температурный и уровенный режим, систематизированы данные, характеризующие химический состав взаимодействующих с грунтами вод и загрязняющих их компонентов.

Используя результаты предварительного прогноза, стационарных наблюдений и материалы инженерно-геологических исследо-

ваний прошлых лет следует выяснить характер неблагоприятных процессов и явлений, возникающих в грунтах при увеличении в них влажности и способных оказать влияние на несущую способность грунтов.

На ранее подтопленных территориях изучить характер и интенсивность неблагоприятного последствия процессов подтопления на грунты, залегающие в основаниях сооружений и в естественных условиях.

В целях установления методики лабораторных испытаний следует собрать данные о конструкции проектируемых сооружений, предполагаемых способах строительства, величине нагрузок на грунтовые основания и режиме их приложения.

6.51. На подготовительной (второй) стадии, при отсутствии информации о влиянии обводнения на деформационное поведение грунтов, определяют способность грунтов к набуханию, просадкам и т.п. с помощью экспрессметодов. Выполняют консолидационные испытания для определения комплекса параметров консолидации, рассчитывают величину осадки, степень консолидации грунтов, а также показатели их плотности в заданный момент времени. Производят полный химический анализ взаимодействующих с грунтами вод или промстоков. При их отсутствии в нужном количестве готовят растворы с идентичным составом, которые используют для замачивания грунтов при проведении испытаний. Выполняют тщательный контроль измерительных устройств и рычажно-передаточной системы приборов, а также их тарировку.

6.52. На третьей, основной, стадии осуществляют испытания механических свойств грунтов природной плотности и влажности и моделирование ожидаемых процессов на основе общей схемы планирования эксперимента, составленной с учетом характера объемных деформаций, проявляющихся при водонасыщении пород в заданных условиях.

6.53. По особенностям деформационного поведения при взаимодействии с грунтовыми водами рассматриваемые типы пород могут быть условно подразделены на три группы:

I. Грунты, снижающие величину модуля деформации и разупрочняющиеся при дополнительном водонасыщении, но не проявляющие объемных деформаций набухания или просадки.

II. Просадочные грунты.

III. Набухающие грунты.

Методика выполнения дальнейших испытаний разрабатывается с учетом этих особенностей.

6.54. Некоторые разновидности слабых грунтов, при естественном сложении и в состоянии незавершенной консолидации заметно реагирующие на повышение влажности, после стабилизации под нагрузками 0,15–0,2 МПа (1,5–2,0 кгс/см) не проявляют при замачивании дополнительных деформаций. Поэтому при

выполнении модельных опытов должны испытываться грунты со структурой, соответствующей структуре грунтов оснований в момент их критического обводнения. Учитывая это, необходимо до осуществления экспериментов определить консолидационные параметры и произвести соответствующие расчеты.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ КОНСОЛИДАЦИИ ПРИ ОДНОМЕРНОМ СЖАТИИ

6.55. Уплотнение под нагрузкой сильносжимаемых глинистых органических и органо-минеральных грунтов протекает очень медленно, поэтому при их использовании в качестве оснований сооружений требуется прогноз величины конечной осадки и времени ее стабилизации под действием внешнего давления. Прогноз развития протекания осадок во времени используется также для оценки несущей способности грунтовых оснований в различные периоды строительства и эксплуатации сооружения.

Степень консолидации грунтовых оснований необходимо учитывать и при постановке опытов, моделирующих воздействие процессов подтопления на грунты, находящиеся в состоянии незавершенной консолидации.

При сжатии слабоуплотненных грунтов с водно-коллоидными связями нагрузка, прикладываемая к поверхности грунта, полностью или частично передается на воду и, создавая в ней напор, вызывает ее фильтрационное отжатие, сопровождающееся деформацией уплотнения. После исчезновения порового давления грунты продолжают деформироваться вследствие так называемой вторичной консолидации, обусловленной ползучестью скелета.

В зависимости от консистенции, плотности и особенностей структуры грунта, а также от величины действующей нагрузки, доля того или иного вида консолидации в процессе уплотнения грунтов различна. У слабоуплотненных водонасыщенных глинистых грунтов с водно-коллоидными связями осадки, обусловленные фильтрационной консолидацией, составляют 55–96 %. У плотных глин преобладают явления ползучести. Однако, как показали исследования, подобное разграничение консолидационного процесса на две фазы является весьма условным, так как у большинства грунтов фильтрационное уплотнение и ползучесть протекают одновременно, а точность прогнозных расчетов зависит от полноты учета факторов, влияющих на развитие этих процессов: структурной прочности грунта, фильтрации сжимаемой поровой воды, ползучести скелета, обусловленной его минералогическим составом и др. При этом следует принимать во внимание нелинейность фильтрационных и деформационных характеристик грунтов, их анизотропию и изменчивость во времени.

6.56. Учитывая особенности структуры и деформационного поведения грунтов для прогноза скорости их консолидации под

нагрузкой применяются различные аналитические решения, базирующиеся на теориях консолидации, линейной и нелинейной ползучести.

Согласно результатам экспериментальных исследований и опыту строительства на слабых грунтах для глинистых пород текучей и текучепластичной консистенции с водно-коллоидными связями применимы решения, основанные на теории фильтрационной консолидации, главным расчетным параметром которой является коэффициент консолидации C_v.

6.57. Для достоверного прогноза осадок во времени глинистых грунтов с развитыми структурными связями, уплотненных разновидностей этих пород, а также органических и органо-минеральных грунтов требуется одновременный учет ряда факторов, влияющих на их консолидацию: фильтрации сжимаемой поровой воды и ползучести скелета, нелинейности и изменчивости во времени их фильтрационных и деформационных характеристик, анизотропии и др., что может быть достигнуто при применении новейших расчетных теорий. Однако использование этих теорий на практике до настоящего времени было ограничено необходимостью определения широкого комплекса расчетных параметров, требующего разнообразных, зачастую уникальных измерительных устройств и оборудования. Применение для определения комплекса консолидационных параметров расчетного метода, разработанного Б.В. Сухаревым, в значительной мере устраняет эту проблему.

6.58. Параметры консолидации и ползучести рекомендуется определять по результатам консолидационных испытаний, выполненных в одометрах.

Испытания следует проводить на образцах, предварительно водонасыщенных, под водой, или на образцах с природной влажностью, близкой к полной влагоемкости, с предохранением проб от высыхания в течение опыта. В соответствии с заданием опыты могут проводиться при однократном или ступенчатом нагружении.

6.59. По результатам испытаний устанавливают: величину конечной осадки и значения параметров, характеризующих сжимаемость грунта во времени: коэффициент фильтрационной или первичной консолидации C_v, коэффициент вторичной консолидации C_α, параметры ядра ползучести δ^* и δ_1^*, коэффициент первичного компрессионного сжатия m_c, коэффициент, учитывающий наличие в поровой жидкости газовой составляющей B.

6.60. Основой для косвенного определения КП служат кривые консолидации, построенные по результатам лабораторных испытаний в системе координат $S_i - \lg t$, $S_i - \sqrt{t}$, $e - \lg t$.

6.61. Рекомендуемая методика предусматривает определение консолидационных параметров в условиях одномерного сжатия

при отводе поровой жидкости, только в вертикальном направлении. Полученные параметры можно использовать для расчета конечной величины и времени протекания осадки при применении модели одномерного сжатия и одномерной фильтрации.

ПРОВЕДЕНИЕ ИСПЫТАНИЯ

6.62. Испытания грунтов на компрессию и консолидацию выполняют в компрессионных приборах (одометрах). Грунты тугопластичной и пластичной консистенции испытывают в стандартных приборах, конструктивные особенности которых соответствуют требованиям ГОСТ 23908–79.

6.63. Илы, сапропели, слаборазложившиеся торфы, а также глинистые и органо-минеральные грунты текучей и текучепластичной консистенции рекомендуется испытывать в специально сконструированных приборах, которые отличаются от стандартных по следующим показателям:

1. Приборы, предназначенные для слабых грунтов, должны быть снабжены облегченными штампами и противовесом, полностью уравновешивающим нагрузочные устройства.

2. Конструктивные особенности этих приборов должны обеспечивать передачу на образец малых ступеней нагрузок, порядка 0,002–0,005 МПа, и возможность протекания значительных деформаций (50 % и св. от первоначальной высоты образца) без перестановки рычагов в ходе выполнения опыта.

3. Замер деформаций производится прогибомерами или индикаторами с удлиненными стержнями.

4. Перфорация штампов должна обеспечивать свободный отток раствора, отжимаемого из пор образца при его уплотнении.

5. Для замера порового давления в испытуемых образцах компрессионные приборы должны быть оборудованы мелкопористыми керамическими датчиками или поропьезометрами.

6. Приборы должны быть снабжены устройствами для автоматической записи деформаций.

Примечание. Отмеченными конструктивными особенностями обладают компрессионно-фильтрационная установка ЦНИИС Минтрансстроя и компрессионный прибор для слабых грунтов конструкции Гидропроекта. При отсутствии специальных приборов испытания слабых грунтов на компрессию и консолидацию могут быть выполнены в обычных компрессионных приборах после их переоборудования, включающего: установку на приборе кронштейна с противовесом для уравновешивания нагрузочного устройства, замену металлических штампов облегченными из оргстекла, переход на прямое нагружение образца без рычагов.

6.64. Подготовку приборов и измерительных устройств к испытаниям и их тарировку выполняют в соответствии с требованием ГОСТ 23908–79.

6.65. Образец грунта вырезается из монолита по ГОСТ 5182–78. При работе с илами и грунтами текучепластичной и пластич-

ной консистенции удобно пользоваться лобзиком с туго натянутой струной; при загружении в рабочее кольцо слабо- и среднеразложившихся торфов необходимы остро отточенные ножи, способные перерезать растительные волокна.

6.66. Подготовленное кольцо с грунтом и фильтрами устанавливают в одометр и закрепляют арретирным кольцом, доводя его до соприкосновения с поршнем. Затем образец насыщают предварительно дегазированной водой. Если насыщению подвергались грунты со степенью влажности < 1, после его окончания кольцо с грунтом вынимают из прибора, взвешивают и помещают обратно в прибор.

6.67. Испытание рекомендуется проводить при однократном приложении нагрузки, равной проектному давлению. Слабые грунты, строительство на которых возможно только после их предварительной огрузки песчаным слоем, следует испытывать при ступенчатом приложении двух нагрузок, первая из которых должна соответствовать давлению песчаного слоя, вторая — давлению от проектируемого сооружения.

6.68. После приложения нагрузки замер деформаций проводят одновременно по индикаторам одометра и прибору, измеряющему поровое давление.

Показания индикатора регистрируют через 15″; 30″; 45″; 1′; 1,5′; 2′; 2,5′; 3′; 3,5′; 4′; 5′; 6′; 7′; 8′; 9′; 10′; 12′; 14′; 16′; 18′; 20′; 25′; 30′; 40′; 50′; 60′; 1,5 ч; 2 ч; 2,5 ч; 3 ч; 3,5 ч; 4 ч и далее через каждый час до конца рабочего времени. В последующие дни показания индикаторов фиксируют в начале и в конце рабочего дня.

Примечание. Для облегчения расчетов замеры деформаций в течение всего опыта следует проводить всегда в одно и тоже время.

Испытание считается законченным, если показания индикаторов не меняются в течение 48 ч.

6.69. Разгрузку образца следует производить сразу: сначала удаляется вода, а затем снимают гири.

6.70. После завершения испытания удаляют воду из одометра. Кольцо с влажными фильтрами взвешивают и замеряют его высоту. Затем всю пробу грунта помещают в термостат и высушивают до постоянного веса при температуре 105±2°С.

Данные выполняемых в ходе испытаний измерений заносят в паспорта и в журнал.

6.71. По замеренным в ходе испытаний деформациям одновременно с проведением опытов строят два графика:

1. Кривую зависимости осадки, мм, от десятичного логарифма времени (рис. 22);

2. Кривую зависимости осадки от квадратного корня из времени (время в мин) (рис. 23).

После окончания испытаний по графикам устанавливают время завершения и величину осадок, соответствующих этапам фильтрационной консолидации и ползучести. На основании ана-

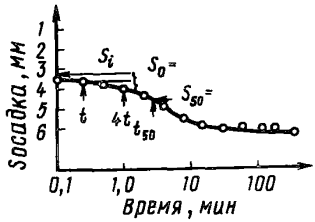


Рис.22. Консолидационная кривая в координатах $S_i - \lg(t)$

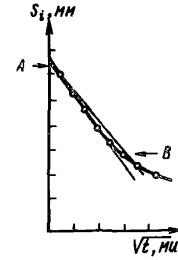


Рис.23. Консолидационная кривая в координатах $S_i - \sqrt{t}$

лиза кривых выбирают методику обработки результатов испытаний для определения консолидационных параметров.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЕЛИЧИНЫ ФИЛЬТРАЦИОННОЙ И ВТОРИЧНОЙ КОНСОЛИДАЦИИ

6.72. Начало фильтрационной консолидации устанавливают по начальному участку кривой, построенной в координатах $S_i - \sqrt{t}$. Точку, соответствующую началу фильтрационного этапа, определяют продолжением прямолинейного участка кривой до оси осадок (точка 1) (см. рис. 23).

Конец фильтрационного уплотнения ($u = 100\,\%$) определяют по кривой, построенной в полулогарифмической системе координат $S_i - \lg t$. Точка пересечения продолжения первого прямолинейного участка (первичной консолидации) с продолжением прямой, соответствующей этапу ползучести, принимается за окончание фильтрационного этапа уплотнения (см. рис. 22).

Величину фильтрационной осадки устанавливают по разности ординат точек, одна из которых соответствует осадке при 100%-ной фильтрационной консолидации (точка B) и нулевой, характеризующей начало фильтрационного этапа (точка A).

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА КОНСОЛИДАЦИИ ПО ЛОГАРИФМИЧЕСКОМУ МЕТОДУ А. КАЗАГРАНДЕ

6.73. При определении коэффициента консолидации по методу Казагранде необходимые для его расчета параметры находят при обработке консолидационной кривой, построенной в системе координат S_i (мм) $- \lg t$ (мин) (см. рис. 22). По лабораторной кривой устанавливают время начала фильтрационного этапа, деформации уплотнения, соответствующие 100 и 50 % первичной консолидации, а также время, соответствующее 50 % последней.

Начальная часть кривой зависимости деформации сжатия от логарифма времени представляет собой параболу. Поэтому для нахождения точки, соответствующей началу фильтрационной фазы уплотнения, на начальном участке кривой находят две точки, для которых время находится в соотношении 1:4 (например, 12″ и 48″). Тогда разность в показаниях индикатора в этих двух точках (t_4 и t_1) равна разности между показанием первой точки и показанием, соответствующим приведенному 0. Исходя из сказанного, начало фильтрационного этапа находят, откладывая верх от ординаты точки A_1 разность ординат точек t_4 и t_1.

Деформацию при 100 %-ной фильтрационной консолидации устанавливают по ординате пересечения двух прямых, одна из которых является продолжением прямолинейного участка кривой консолидации, соответствующего фазе ползучести; другая – касательной к отрезку кривой на участке, соответствующему фильтрационному этапу уплотнения. По половине разности показаний индикатора в точках B и A_0 находят осадку образца при 50 %-ной фильтрационной консолидации и устанавливают время, соответствующее этой осадке (t_{50}). Коэффициент консолидации C_v, см^2/с, рассчитывают по формулам:

$$C_v = \frac{0{,}197\ (0{,}5\,H_{50})^2}{t_{50} \cdot 60}$$ – для опытов с двухсторонней фильтрацией;

$$C_v = \frac{0{,}197\ (H_{50})^2}{t_{50} \cdot 60}$$ – для опытов с односторонней фильтрацией,

где 0,197 – числовой коэффициент для 50 % первичной консолидации;
H_{50} – высота образца при 50 % первичной консолидации.

МЕТОД КВАДРАТНЫХ КОРНЕЙ ИЗ ВРЕМЕНИ Д. ТЕЙЛОРА

6.74. Коэффициент консолидации C_v по методу Тейлора определяют путем обработки консолидационной кривой, построенной в системе координат S_i и $\sqrt{t}$, где S_i – деформация сжатия грунта, мм (см. рис. 23). На графике проводят прямую, совпадающую с начальным прямолинейным участком кривой консолидации. Пересечение этой кривой с осью ординат дает точку A, которая называется точкой начала первичной консолидации. Из точки A проводят вторую прямую, абсциссы которой составляют 1,15 соответствующих абсцисс первой прямой. Точка пересечения второй прямой с экспериментальной кривой

(точка B) определяет 90 % консолидации, а соответствующее ей время дает t_{90}.

Коэффициент консолидации C_v, см^2, при двухсторонней фильтрации определяется по формуле:

$$C_v = \frac{0{,}848\ (0{,}5H)^2}{t_{90} \cdot 60},$$

где 0,848 – числовой коэффициент Тейлора для 90 % первичной консолидации; H – высота образца, см; t_{90} – время, соответствующее 90 % первичной консолидации, мин.

Если опыт проводился с односторонней фильтрацией, в формулу подставляется полная высота образца, см.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ВТОРИЧНОЙ КОНСОЛИДАЦИИ

6.75. Коэффициент вторичной консолидации C_α определяют только в тех случаях, когда после завершения фильтрационной осадки дальнейшее протекание осадок во времени удовлетворительно описывается логарифмической зависимостью.

На графиках, построенных в координатах $e - \lg t$, вторичная консолидация характеризуется прямой линией (при однократном загружении) или серией прямых (при ступенчатом загружении) с различными углами наклона к оси абсцисс.

Уравнение прямых линий вторичной консолидации может быть записано формулой

$$\Delta e = -\alpha (\lg t_2 - \lg t_1) = -\alpha \lg \left(\frac{t_2}{t_1}\right),$$

где t_1 – период времени, необходимый для завершения фильрационной консолидации;

t_2 – период времени от момента приложения нагрузки до произвольно выбранного на участке ползучести момента времени;

α – коэффициент вторичной консолидации, равный тангенсу угла наклона вторичной консолидации прямой к оси десятичного логарифма времени.

Расчет коэффициента вторичной консолидации C_α производят по формуле

$$\alpha = \frac{\Delta e}{\lg \left(\frac{t_2}{t_1}\right)}.$$

ИНТЕГРАЛЬНЫЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ОДНОМЕРНОЙ КОНСОЛИДАЦИИ

6.76. Современные аналитические методы прогноза протекания осадок во времени требуют определения комплекса параметров, характеризующих ползучесть скелета грунта, фильтра-

цию сжимаемой поровой жидкости и ряда других факторов, что является весьма трудоемкой задачей, требующей специального оборудования и проведения длительных испытаний.

6.77. Интегральный метод заключается в определении консолидационных параметров (КП) на основе решения обратной (коэффициентной) задачи консолидации с помощью ЭВМ, содержанием которой является восстановление значений КП по данным консолидационных испытаний.

6.78. Для расчета прямой задачи консолидации, позволяющей прогнозировать развитие осадок во времени, рассчитывают следующие параметры: C – коэффициент консолидации; B – коэффициент, учитывающий сжимаемость газированной поровой жидкости; m_c – коэффициент первичной относительной сжимаемости; $\delta^0; \delta_1^0$ – параметры ядра ползучести скелета грунта.

Исходными данными для работы программы служат характеристики, которые определяются при испытаниях грунтов на консолидацию, указанные в п.6.84.

6.79. Проверка интегрального метода, осуществленная на характерных литологических типах слабых грунтов, показала практически полную сходимость между экспериментальными значениями осадок и найденными расчетным способом с применением этого метода. Максимальные отклонения между экспериментальными и теоретическими значениями осадок не превышают 5–7 % (рис.24, 25; табл. 20).

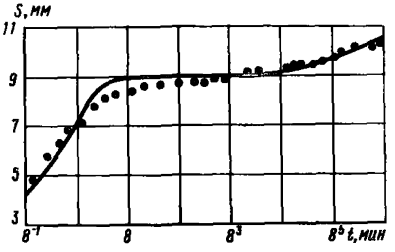


Рис.24. Консолидационная кривая торфа
——— – теоретическая кривая, рассчитанная по параметрам, определенным по интегральному методу; ... – экспериментальные данные, полученные при испытаниях грунтов на консолидацию

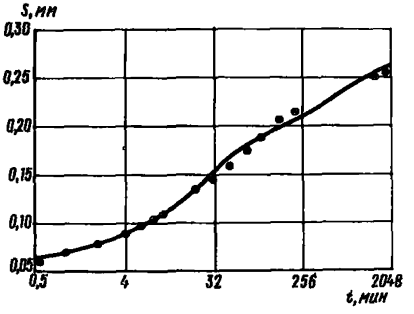


Рис.25. Консолидационная кривая тяжелого суглинка.
——— – теоретическая кривая, рассчитанная по параметрам, определенным по интегральному методу; ... – экспериментальные данные, полученные при испытаниях грунта на консолидацию

Таблица 20

Номер опыта	Высота образца, мм	Приращение нагрузки, МПа	Коэффициент консолидации $C = \frac{K_\Phi \beta}{m_c \rho_w}$, мм^2/мин	Коэффициент первичной относительной сжимаемости m_c, 1/МПа	Коэффициент, учитывающий сжимаемость поровой воды B (безразмерный)	Параметры экспоненциального ядра ползучести	
						δ_1, 1/мин	δ, 1/мин
БИС 2-2	20	0,049	63,32	8,92	0,681	$0{,}230 \cdot 10^{-4}$	$0{,}361 \cdot 10^{-5}$
БИС 3-1	30	0,025	98,73	0,216	0,586	$0{,}303 \cdot 10^{-2}$	$0{,}135 \cdot 10^{-2}$
БИС 3-5	29,35	0,025	4,43	0,251	0,722	$0{,}165 \cdot 10^{-2}$	$0{,}725 \cdot 10^{-3}$
БИС 5-4	24,06	0,025	38,12	0,350	0,914	$0{,}759 \cdot 10^{-2}$	$0{,}290 \cdot 10^{-2}$

I. Прямая задача

6.80. Прямая задача состоит в нахождении осадок во времени и порового давления при известных значениях фильтрационных и деформационных характеристик грунта.

Рассмотрим одномерную консолидацию слоя квазидвухфазного грунта высотой h, загруженного нагрузкой σ, при двухсторонней фильтрации поровой жидкости. Скелет грунта обладает реологическими свойствами.

Тогда при экспоненциальном ядре ползучести скелета грунта вида $K(t) = \delta \cdot \exp(-\delta_1 t)$ осадка во времени $S(t)$ и поровое давление $p(x,t)$ на глубине x от дневной поверхности описываются следующими формулами:

$$S(t) = m_e \sigma h \left\{1 - \frac{8}{\pi} B u(t) + \frac{\delta}{\delta_1}\left(1 - e^{-\delta_1 t}\right)\right\}; \qquad (4)$$

$$p(x,t) = \beta B \sigma \cdot \psi(x,t), \quad \text{где}$$

$$u(t) = \sum \frac{1}{m^2}\left\{F_m e^{\omega_1 t} - D_m e^{\omega_2 t} + \delta\left[F_m \frac{e^{\omega_1 t} - e^{-\delta_1 t}}{\omega_1 + \delta_1} - D_m \frac{e^{\omega_2 t} - e^{-\delta_1 t}}{\omega_2 + \delta_1}\right]\right\}; \qquad (5)$$

$$m = 1,3,5\ldots$$

$$\psi(x,t) = \frac{4}{\pi} \sum \frac{1}{m}\left\{F_n e^{\omega_1 t} - D_m e^{\omega_2 t}\right\} \sin\left(\frac{m\pi x}{h}\right); \; m = 1,3,5\ldots;$$

$$F_m = \frac{\delta + \delta_1 + \omega_1}{\omega_1 - \omega_2}; \qquad D_m = \frac{\delta + \delta_1 + \omega_2}{\omega_1 - \omega_2};$$

$$\omega_1 = -Q_m + \sqrt{Q_m^2 - R_m}; \quad \omega_2 = -Q_m - \sqrt{Q_m^2 - R_m};$$

$$Q_m = \frac{1}{2}(\delta_1 + \delta_B + c_k \alpha_m^2); \quad R_m = \delta_1 c_k \alpha_m^2;$$

$$c_k = cB; \quad \alpha_m = \pi m / h.$$

Здесь введены следующие консолидационные параметры:

c – коэффициент консолидации

$$c = k_\phi \beta / (\rho_w m_c),$$

где k_ϕ – коэффициент фильтрации; β – отношение "первичных" коэффициентов компрессионного сжатия и одномерного разуплотнения скелета грунта при действии поровой жидкости; ρ_w – объемная масса поровой жидкости; m_c – "первичный" коэффициент компрессионного сжатия; B – коэффициент, учитывающий наличие газовой составляющей в поровой жидкости:

$$B = \frac{1}{1 + n m_w \cdot \beta / m_c},$$

где n – пористость; m_w – коэффициент сжимаемости газированной поровой жидкости.

Из (1) и (2) вытекают решения различных частичных задач. Так, например, для двухфазных грунтов необходимо принять $B = 1$, а для грунтов, у которых ползучестью скелета можно пренебречь, – $\sigma^c = 0$.

Примечание. При односторонней фильтрации в формулах (4), (5) следует подставлять удвоенное значение высоты слоя h, но полученную при этом величину осадки уменьшить в два раза.

II. Обратная задача

6.81. Обратная задача заключается в нахождении консолидационных параметров, на основании которых решается прямая задача уплотнения грунтов. Так, анализ набора параметров, которые необходимы для расчетов осадок во времени, показывает, что экспериментальному определению подлежат c, B, m_c и параметры ядра ползучести δ^c; δ_1^c.

Предлагаемый метод определения КП базируется на следующем интегральном аналоге уравнения консолидации:

$$\left[\Phi(t) + \int_0^t K(t-\tau)\Phi(\tau)d\tau\right] + \frac{1-B}{B}\left[\Phi(t) - \lambda_0(t)\frac{h^3}{12}\right] = c\int_0^t [h\lambda_0(t) - S(t)]dt, \qquad (6)$$

где

$$\lambda_0(t) = m_c\sigma\left[1 + \int_0^t K(t-\tau)d\tau\right];$$

$$\Phi(t) = [\sigma S(t) - \lambda_0(t)h]\cdot h^2/60, \quad \text{если}$$

$$S(t) \geq \frac{1}{3}h[2(1-B)m_c\sigma + \lambda_0(t)],$$

иначе

$$\Phi(t) = \{([(h-2x_1)5h + 4x_1^2]2[(\lambda_0(t) - (1-B)m_c\sigma/(h-x_1)] -$$

$$- 10\lambda_0(t)(3h - 4x_1))x_1^2 + 30S(t)\cdot(h-x_1)x_1 + 5(h-2x_1)^3 \times$$

$$\times (1-B)m_c\sigma\}/60,$$

где $x_1 = \frac{3}{8}(2h-M) - \sqrt{\frac{9}{64}(2h-M)^2 - \frac{3}{4}h(h-M)}$;

$$M = [h\lambda_0(t) - S(t)]/[\lambda_0(t) - (1-B)m_c\sigma].$$

Пусть T – время стабилизации осадки. Тогда (3) можно представить в виде $[1 + \int_0^T K(t)dt]\cdot S_k h^2 = 12c\int_0^T [h\lambda_0(t) - S(t)]dt$, (7) где S_k – конечное значение осадки.

Выражения (6) и (7) связывают величины c, B, m_c и параметры ядер ползучести со значениями осадки во времени. Поэ-

тому использование интегрального аналога позволяет найти неизвестные КП по результатам одних консолидационных испытаний.

В этом случае расчет КП при экспоненциальном ядре ползучести можно провести по следующей методике:

1. Проводятся компрессионные испытания образца грунта с замерами осадки $S(t)$.

2. Кривая $S(t)$ аппроксимируется подходящими функциями.

3. Определяется параметр δ_1 по одной из следующих схем:

а) кривая консолидации в пределах ветви вторичной консолидации аппроксимируется зависимостью $S(t) = S_к - Ae^{-\delta_1 t}$, где A – параметр, откуда находится δ_1, например, градиентными методами;

б) последовательно вычисляются величины

$$\delta_{1i} = [S_к - S(t_i)] / \int_{t_i}^{T} [S_к - S(t)]dt; \quad i = 0,1 \ldots n-1;$$

$$t_i = \frac{T}{n} i, \tag{8}$$

где n – число интервалов разбиения периода стабилизации осадки.

Начиная с некоторого t_i величины δ_{1i} для экспоненциального ядра $K(t)$ становятся постоянными и равными δ_1.

Применение (5) позволяет отказаться от контроля порового давления в процессе проведения опытов и от некорректной операции дифференцирования экспериментальной функции $S(t)$, в отличие от предлагаемой Ю.К. Зарецким методики.

4. Значение осадки в пределах ветви первичной консолидации, выявленной по методу Казагранде, разбивается приблизительно на три равные части.

Для моментов времени в точках разбиений (t_1; t_2; t_3) образуются интегральные аналоги (6):

$$\frac{1}{B}\Phi(t_j) + \delta \int_0^{t_j} e^{-\delta_1(t_j-\tau)}\Phi(\tau)d\tau - \frac{1-B}{B}\frac{h^3}{12} m_c \sigma \times$$

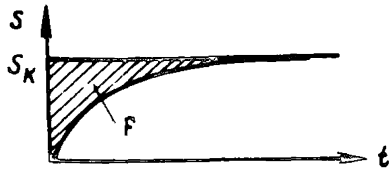
$$\times \left[1 + \frac{\delta}{\delta_1}\left(1 - e^{-\delta_1 t_j}\right)\right] = c\left\{\int_0^{t_j} [S_к - S(\tau)]d\tau - (1 - e^{-\delta_1 t_j}) \times \right.$$

$$\left. \times (S_к - m_c \sigma h)/\delta_1 \right\}; \quad j = 1,2,3,\ldots \tag{9}$$

где $\Phi(t_j)$ – вычисляется по тем же, что и в (6), формулам с учетом

$$\lambda_0(t) = m_c \sigma \left[1 + \frac{\delta}{\delta_1}\left(1 - e^{-\delta_1 t}\right)\right].$$

Рис.26. Вспомогательный график для расчета параметров консолидации и ползучести интегральным методом



Выражения (9) составляют систему уравнений относительно неизвестных c, β, m_c, которая решается одним из численных методов, например, методом Ньютона–Рафсона. Параметр σ^1 определяется из формулы $\sigma^1 = \sigma^1_1 \left(S_K / (h m_c \sigma) - 1 \right)$. Для двухфазных грунтов количество уравнений сокращается до двух.

5. При известных значениях c, β, m_c параметр σ^1_1 пересчитывается с помощью формулы (7). После этого вычисления, начиная с п.4, можно повторить до получения КП требуемой точности.

Если можно пренебречь явлениями ползучести, то коэффициент консолидации определяется из выражения

$$S_K h^2 = 12 c \int_0^T [S_K - S(t)] dt. \qquad (10)$$

Обозначим через F площадь между асимптотой конечной осадки и кривой текущей осадки (рис. 26). Тогда выражение (10) переписывается в элементарном виде

$$c = \frac{S_K \cdot h^2}{12 \cdot F}.$$

Примечание. Рассмотренный набор консолидационных параметров c; β; m_c; σ^1; σ^1_1 ориентирован на расчет осадки во времени. Для нахождения порового давления, кроме того, необходим параметр β. Его можно определить, если знать величину давления, например в начальный момент времени

$$\beta = \frac{p(t=0)}{\sigma}.$$

КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ ПРОГРАММЫ

6.82. Программа предназначена для определения консолидационных параметров квазидвухфазных грунтов, ползучесть скелета которых описывается линейными уравнениями наследственного типа с экспоненциальными ядрами $K_c(t) = K_B(t) = \sigma^1_{exp}(-\sigma^1_1 t)$.

В основе программы лежит использование интегрального аналога линейного дифференциального уравнения одномерной консолидации

$$\frac{\tilde{m}_c}{m_c}\{\varphi(t)\} + \frac{1-\beta}{\beta}\left[\varphi(t) - \frac{h^3}{12}\tilde{m}_c\{\sigma(t)\}\right] = c\int_0^t [h\tilde{m}_c\{\sigma(\tau)\} - S(\tau)]\, d\tau,$$

где $\tilde{m}_c\{y(t)\}$ – интегральный оператор, который воздействует на произвольную функцию $y(t)$ следующим образом:

$$\tilde{m}_c\{y(t)\} = m_c\left[y(t) + \int_0^t K_c(t-\tau)y(\tau)d\tau\right].$$

6.83. Для решения прямой задачи консолидации, позволяющей прогнозировать развитие осадок во времени, программой рассчитываются следующие консолидационные параметры: c – коэффициент консолидации; B – коэффициент, учитывающий сжимаемость газированной поровой жидкости; m_c – коэффициент первичной относительной сжимаемости; σ^*; σ_1^* – параметры ядра ползучести скелета грунта.

Исходными данными для работы программы служат: h – высота образца, испытываемого в компрессионном приборе; σ – прикладываемая к образцу ступень нагрузки; t_i – моменты времени, когда выполняются замеры осадки в процессе консолидационных испытаний; S_i – замеренная осадка образца в момент времени t_i; $i=\overline{1,n}$; T_j – моменты времени, для которых составляются интегральные аналоги $j=\overline{1,4}$; $T_j < T_{j+1}$. Величины $T_1 - T_3$ соответствуют значениям осадок, разбивающим ветвь первичной консолидации, выявленной по методу Казагранде, приблизительно на три равные части. Величина T_4 принимается равной времени стабилизации осадки или окончания эксперимента.

Кроме того, задается совокупность параметров программы, управляющих ходом вычислительного процесса.

Укрупненная блок-схема программы определения консолидационных параметров квазидвухфазных грунтов при экспоненциальных ядрах ползучести интегральным методом

6.84. А. Блок ввода исходных данных, в том числе
h; σ; T_j; $j=\overline{1,4}$ $(T_j < T_{j+1})$; t_i; S_i; $i=\overline{1,n}$.

Б. Блок аппроксимации экспериментальных данных $t_i - S_i$ ортогональными полиномами Чебышева $S = f(t)$.

В. Блок аппроксимации конечного участка кривой консолидации ($t \geqslant t_m$) функцией $S(t) = S_\infty - A \cdot exp(-\sigma_1^* t)$ путем минимизации $\varphi(S_\infty; \sigma_1^{(0)}; A) = \sum_{i=1}^{n} [S_i - S(t_i)]^2$ методом переменной метрики Дэвидона–Пауэлла.

Г. Блок решения обратной задачи по определению консолидационных параметров:

1. Начало цикла по k для расчета σ_1^*.
2. $\sigma_1^k = \sigma_1^{k-1}$ ($\sigma_1^{(0)}$ принимается из п.В).
3. Начало цикла по i для расчета B.
4. $B = B^{(i-1)}$ $(B^{(0)} = 1)$.
5. Определение m_c при фиксированных значениях σ_1^* и B методом половинного деления из условия $c(T_2) = c(T_3)$, где

$$c(T_j)=\frac{\frac{\tilde{m}_c}{m_c}\{\Phi(T_j)\}+\frac{1-B}{B}\left[\Phi(T_j)-\frac{h^3}{12}\tilde{m}_c\{\sigma(T_j)\}\right]}{\int_0^{T_j}\left[h\tilde{m}_c\{\sigma(\tau)\}-S(\tau)\right]\alpha\tau},$$

причем $0<m_c\le S_к/(\sigma h)$.

6. Начало цикла по e для расчета α при фиксированных c, m_c, $\sigma_1^{(e-1)}(\alpha^{(0)}=(1-B)/B)$.

7. $\alpha=\alpha^{(e-1)}$.

8. $$\alpha^{(e)}=\frac{c\int_0^{T_1}\left[h\tilde{m}_c\{\sigma(\tau)\}-S(\tau)\right]\alpha\tau-\frac{\tilde{m}_c}{m_c}\{\Phi(T_1)\}}{\Phi(T_1)-\frac{h^3}{12}\tilde{m}_c\{\sigma(T_1)\}}.$$

9. Если заданная точность вычисления α достигнута, то идти к п.11.

10. Конец цикла по e.

11. Если получившееся значение $\alpha^{(e)}<0$, то принимается $\alpha^{(e)}=0$ (двухфазный грунт).

12. $B^{(i)}=1/(1+\alpha^{(e)})$.

13. Если заданная точность вычисления B достигнута, то идти к п.15.

14. Конец цикла по i.

15. Определение $\sigma_i^{(k)}$ при фиксированных c, m_c, $B=B^{(i)}$

$$\sigma_1^{(k)}=\frac{c(S_к-m_c\sigma h)\cdot[1-\exp(-\sigma_1^{(k)}T_4)]}{c\int_0^{T_4}[S_к-S(t)]dt-\frac{\tilde{m}_c}{m_c}\{\sigma(T_4)\}-\frac{1-B}{B}\left[\Phi(T_4)-\frac{h^3}{12}\tilde{m}_c\{\sigma(T_4)\}\right]}.$$

16. $\sigma^{(k)}=\sigma_1^{(k)}[S_к/(m_c\sigma h)-1]$.

17. Если заданная точность вычисления σ_1 достигнута, то идти к п.19.

18. Конец цикла по k.

19. Печать результатов: c; m_c; B; $\sigma_1^{(k)}$; $\sigma_1^{(e)}$.

Д. Блок решения прямой задачи по определению теоретических значений $S(t_i)$ при найденных консолидационных параметрах. Печать результатов решения прямой задачи.

Е. Конец программы.

Программа написана на алгоритмическом языке ФОРТРАН-4 для ЭВМ ЕС-1022.

Пример расчета

6.85. В качестве примера использования полученных интегральным методом консолидационных параметров КП рассмотрим решение одной прямой задачи.

Требуется найти осадку через $t = 10$ сут с момента приложения нагрузки $\sigma = 0{,}049$ МПа (0,5 кг/см^2) для слоя торфа высотой $h = 5$ м при двухсторонней фильтрации поровой жидкости.

КП, полученные при обработке результатов консолидационных испытаний образца торфа высотой 2 см, имеют следующие значения:

$m_c = 0{,}8922$ см^2/кг (9,104 1/МПа);

$B = 0{,}6813$;

$c = K_\Phi / \rho_w m_c = 63{,}323$ мм^2/мин $= 0{,}09119$ м^2/сут;

$\delta_1 = 0{,}2303 \cdot 10^{-4}$ 1/мин $= 0{,}03316$ 1/сут;

$\delta = 0{,}3613 \cdot 10^{-5}$ 1/мин $= 0{,}005202$ 1/сут.

Ориентируясь на ручной расчет, необходимые формулы запишем в виде:

$$S(t) = m_c \sigma h \left[1 + \frac{\delta}{\delta_1} (1 - e^{-\delta_1 t}) - \frac{8}{\pi^2} B u \right], \qquad (11)$$

где

$$u = \sum_m \psi_m ; \quad m = 1, 3, 5 \ldots \qquad (12)$$

$$\psi_m = \frac{1}{m^2} \left[x_m + \delta (y_m - z_m) \right]. \qquad (13)$$

Здесь введены сокращения:

$$x_m = F_m e^{\omega t} - D_m e^{\omega_2 t};$$

$$y_m = F_m \frac{e^{\omega_1 t} - e^{-\delta_1 t}}{\omega_2 + \delta_1};$$

$$z_m = D_m \frac{e^{\omega_2 t} - e^{-\delta t}}{\omega_2 + \delta_1};$$

$$F_m = \frac{\delta^2 + \delta_1 + \omega_1}{\omega_1 - \omega_2}; \; D_m = \frac{\delta^2 + \delta_1 + \omega_2}{\omega_1 - \omega_2};$$

$$\omega_1 = -Q_m + \sqrt{Q_2 - R_m}; \; \omega_2 = -Q_m - \sqrt{Q_m^2 - R_m};$$

$$Q_m = \frac{1}{2} (\delta_1 + B\delta + c_k \alpha_m^2); \; R_m = \delta_1 c_k \alpha_m^2;$$

$$\alpha_m = \pi m / h; \; c_k = Bc.$$

Предварительно вычислим:

$$\delta_1 + \delta = 0{,}03316 + 0{,}005202 = 0{,}03836 \text{ 1/сут},$$

$\sigma_1^1 + B\sigma^1 = 0{,}03316 + 0{,}6813 \cdot 0{,}005202 = 0{,}03671$ 1/сут;

$c_к = 0{,}6813 \cdot 0{,}09119 = 0{,}06213$ м^2/сут;

$e^{-\sigma_1^1 t} = e^{-0{,}03316 \cdot 10} = 0{,}7178$;

$1 + \frac{\sigma^1}{\sigma^1}(1 - e^{-\sigma_1^1 t}) = 1 + \frac{0{,}005202}{0{,}03316}(1 - 0{,}7178) = 1{,}0443.$

Расчет значений ψ_m по формуле (13) для m=1,3 и т.д. сведем в табл. 21:

Таблица 21

m	$m=1$	$m=3$	$m=5$
α_m	0,6283	1,8850	3,1416
R_m	0,0008133	0,007320	0,02033
Q_m	0,03062	0,1287	0,3250
ω_1	−0,01948	−0,03255	−0,03296
ω_2	−0,04176	−0,2249	−0,6169
$e^{\omega_1 t}$	0,8230	0,7222	0,7192
$e^{\omega_2 t}$	0,6586	0,1055	0,002092
F_m	0,8477	0,03023	0,009254
D_m	−0,1524	−0,9698	−0,9908
X_m	0,7980	0,1242	0,008728
Y_m	6,519	0,2194	0,06643
Z_m	−1,047	−3,097	−1,2146
ψ_m	0,8374	0,01571	0,0006156

Очевидно, из условия точности вычисления и по формуле (12) можно ограничиться m= 5. Тогда:

$u = \Sigma \psi_m = 0{,}85373$; $m = 1,3,5$.

Значение осадки при t= 10 сут равно:

$$S = 9{,}104 \cdot 0{,}49 \cdot 5 \left[1{,}0443 - \frac{8}{3{,}142^2} \cdot 0{,}6813 \cdot 0{,}85373\right] = 1{,}278 \text{ м}.$$

Величину стабилизированной осадки подсчитаем по формуле:

$$S_к = m_c G h \left(1 + \frac{\sigma^1}{\sigma_1^1}\right) = 9{,}104 \cdot 0{,}049 \cdot 5 \left(1 + \frac{0{,}005202}{0{,}03316}\right) = 2{,}581 \text{ м}.$$

Степень консолидации при t = 10 сут. 1,278/2,581 = 0,495.

Следует отметить, что расчет осадок во времени по формулам (11) – (13) можно запрограммировать и выполнять на любой малой ЭВМ.

КОМПРЕССИОННЫЕ ИСПЫТАНИЯ ГРУНТОВ, НЕ ПРОЯВЛЯЮЩИХ ПРИ ПОДТОПЛЕНИИ ПРОСАДОЧНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ И НАБУХАНИЯ

6.86. Эта группа объединяет слабо и среднеуплотненные органические, органо-минеральные, глинистые и пылеватые грунты, залегающие в зоне аэрации и имеющие степень влажности > 0,7. К ней же относятся водонасыщенные разновидности этих пород, обладающие способностью к осмотическому поглощению влаги за счет разности концентраций электролитов в поровых растворах пород и в составе взаимодействующих с ними вод. Однако, ввиду весьма малых деформаций набуха-

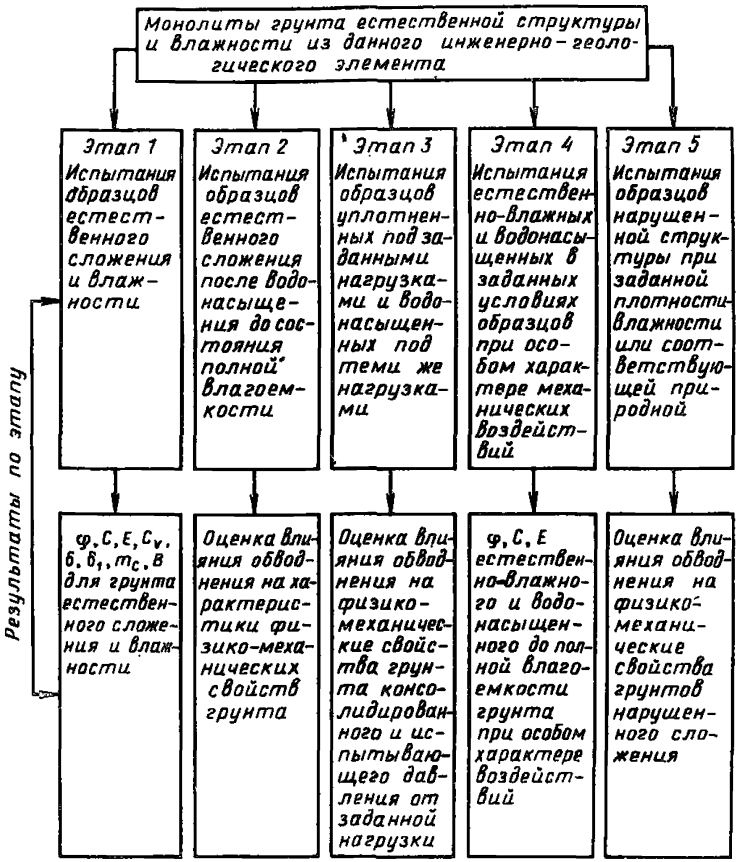


Рис.27. Общая схема планирования эксперимента для грунтов, не проявляющих способности к набуханию и просадке

ния, эти грунты по критерию СНиП II-15-74 также относятся к категории ненабухающих.

6.87. Характерной особенностью подобных грунтов является снижение сопротивления сдвигу при взаимодействии с водой за счет уменьшения величины удельного сцепления, а иногда и угла внутреннего трения. В то же время, сжимаемость этих грунтов в условиях обводнения изменяется по-разному в зависимости от состава, структуры, исходной влажности и условий напряженного состояния. При этом величина модуля деформации может уменьшаться, оставаться неизменной или в некоторых, отмеченных выше случаях, даже возрастать.

6.88. Определение физико-механических свойств и моделирование грунтов первой группы следует осуществлять на основе общей схемы планирования эксперимента, представленной на рис.27.

Этап 1 – реализуется во всех случаях и является основным для получения нормативных и расчетных показателей грунтов в природном состоянии до начала их подтопления.

Кроме характеристик, определение которых регламентировано СНиП, при изысканиях на территориях, сложенных сильносжимаемыми грунтами, а также в целях прогноза влияния обводнения на деформативные свойства грунтов, залегающих в основаниях сооружений, необходимо определять параметры консолидации и ползучести грунтов по методике, изложенной в предыдущем разделе.

Этап 2 – дает возможность прогнозировать изменение сжимаемости и прочности грунтов при увеличении в них влажности на незастроенных участках или в начальный период строительства. Сопоставление данных по 1 и 2 этапам позволяет оценить влияние обводнения на грунты естественного сложения путем вычисления коэффициентов, указанных в п.6.48.

Этап 3 – реализуется в тех случаях, когда требуется оценить влияние дополнительного обводнения на физико-механические свойства грунтов, залегающих в основаниях сооружений или уплотненных под влиянием различных геотехнических факторов: огрузка временной или постоянной пригрузкой и т.п.

При осуществлении экспериментального моделирования следует учитывать степень консолидации грунтов к началу их подтопления (обводнения). Поэтому модельные опыты необходимо проводить на образцах, физическое состояние которых будет соответствовать грунтам, испытывающим давление от сооружения, в заданный момент времени. На этом этапе возможно применение метода факторного планирования эксперимента.

Этап 4 – дает возможность прогнозировать изменение характеристик прочности и сжимаемости у грунтов при особом характере механических воздействий. Например, для оснований, испытывающих влияние повторных нагрузок от периодически загружаемых и опоражниваемых сооружений (резервуары, элеваторы и др.) или вибродинамические воздействия от транспорта и технического оборудования, производится моделирование этих процессов.

Этап 5 – необходим для оценки физико-механических свойств насыпных грунтов при заданном физическом состоянии, при этом испытания грунтов проводятся на образцах нарушенной структуры. Сопоставление данных по этапам 1 и 5 позволяет охарактеризовать влияние нарушения естественного сложения грунтов путем вычисления коэффициентов:

$$K_C = \frac{C_{ест}}{C_{нар}}; \qquad (14)$$

$$K_E = \frac{E_{ест}}{E_{нар}}. \qquad (15)$$

6.89. Определение параметров физико-механических свойств структурно-неустойчивых грунтов и модельные опыты рекомендуется проводить в специально сконструированных приборах, с учетом особенностей структуры и физического состояния грунтов. При отсутствии таких приборов возможно использование стандартного оборудования после его некоторого переустройства.

СХЕМЫ ИСПЫТАНИЙ

6.90. Компрессионные испытания структурно-неустойчивых грунтов различных типов следует проводить с учетом требований ГОСТ 23908–79. Выбор аппаратуры, подготовку грунтов к испытаниям рекомендуется осуществлять в соответствии с рекомендациями, данными в настоящей работе (см. пп.6.62, 6.63).

6.91. При реализации программы лабораторного эксперимента, в соответствии с рис. 27, определение параметров сжимаемости рекомендуется выполнять по приведенным ниже схемам.

6.92. По 1 этапу – испытание грунтов естественной структуры и влажности с предохранением проб от высыхания в процессе опыта (Схема I).

По результатам этих испытаний устанавливают параметры сжимаемости грунтов в природном состоянии.

6.93. По 2 этапу – испытание образцов естественного сложения после их свободного водонасыщения, без нагрузки, или под арретиром, с сохранением водного окружения в течение всего опыта (Схема II).

Данные, полученные по II схеме компрессионных испытаний, позволяют определить значения параметров сжимаемости грунтов на незастроенных территориях после их подтопления или при замачивании котлованов.

Сопоставление данных по I и II схемам дает возможность количественно оценить влияние обводнения на сжимаемость грунтов при естественном сложении, вычислением коэффициентов, указанных в п. 6.48.

6.94. По 3 этапу – испытания выполняются на образцах, предварительно уплотненных под заданными нагрузками, с последующим замачиванием под этими же нагрузками.

Эта схема позволяет исследовать деформационное поведение в условиях обводнения грунтов, уплотненных и испытывающих статическую нагрузку.

Для оценки изменения сжимаемости грунтов консолидированных оснований испытания проводят на образцах, предварительно уплотненных до полной стабилизации деформации под заданной нагрузкой и замоченных под этим же давлением. В случае незавершенной консолидации следует испытывать образцы, физическое состояние которых по плотности будет соответст-

вовать степени консолидации грунтов ко времени их подтопления.

Прогноз подъема уровня грунтовых вод устанавливают по данным гидрогеологических исследований. Степень консолидации и величину осадки грунтовых оснований к началу их подтопления рассчитывают по данным консолидационных испытаний.

6.95. 4 этап. При строительстве в Западной Сибири и других районах распространения слабых грунтов большое практическое значение имеет оценка деформаций, возникающих при повторных воздействиях на грунт циклических нагрузок от периодически загружаемых и опоражниваемых сооружений (резервуары, элеваторы и др.).

Для учета деформации повторного загружения проводят компрессионные испытания путем многократного приложения и снятия дополнительной нагрузки на стабилизированный под заданной нагрузкой грунт.

Для оценки влияния обводнения на величину приращения деформации при повторном загружении параллельно испытывают образцы с естественной влажностью и водонасыщенные в заданных условиях. Испытание включает два этапа:

Первый – статический: грунт загружают при ступенчатом приложении нагрузок до заданного предела $P_{полн.} = P_{б_i} + P_{0_i}$.

Второй – циклический: образец уплотняется повторным воздействием нагрузки $P_{пв_i}$, составляющей часть статической нагрузки первого этапа. Опыт ведут до тех пор, пока деформации уплотнения не перейдут в упругую стадию.

В зависимости от режима работы грунта, в основании сооружения, испытывающего повторное загружение, компрессионное испытание образца можно вести в три стадии.

В этом опыте две первые стадии соответствуют циклам, описанным выше, а третья – статическая – заключается в том, что к образцу вновь прикладывается нагрузка, равная $P_{полн.} = P_{б_i} + P_{0_i}$.

Величина повторной нагрузки $P_{пв_i}$ на глубине z (до середины выделенного слоя i) определяется по формуле:

$$P_{пв_i} = \alpha P_{пв}, \qquad (16)$$

где α – коэффициент, учитывающий изменение давления по глубине, определяется по СНиП II-15-74.

Длительность цикла испытания $t_л$ может быть обусловлена достижением условности стабилизацией деформации от каждой последовательно прилагаемой нагрузки по ГОСТ 23908–79 или соответствовать натурному циклу $t_н$. В последнем случае продолжительность выдерживания каждой ступени давления при повторном загружении может быть определена по зависимости:

$$t_л = t_н (h_л / h_н)^h. \qquad (17)$$

Приращение деформаций при повторных воздействиях $\Delta S_{пв_i}$ определяют суммированием деформаций в процессе циклического загружения.

Графики компрессионных испытаний строятся по усредненным данным трех параллельных испытаний. На обобщенном графике приводятся: первая ветвь нагрузки; ряд промежуточных ветвей циклического нагружения i с соответствующими кривыми их разгрузки; последняя ветвь, отражающая развитие деформаций грунта, получившего уплотнение от предшествующих загружений, и соответствующая только упругой деформации.

По результатам испытаний рассчитывают:

1. Приращение деформаций при повторных воздействиях $\Delta S_{пв_i}$ находится суммированием деформаций в процессе циклического загружения.

2. Коэффициент влияния повторности статического воздействия для слоя $K_{пв_i}$ определяется отношением приращения деформации при повторных воздействиях $\Delta S_{пв_i}$ к деформации S_{0_i} от первоначальной статической нагрузки P_{0_i} до их приложения:

$$K_{пв_i} = \Delta S_{пв_i} / S_{0_i}. \qquad (18)$$

3. Модуль общей деформации грунта при однократном загружении ($E_{одн}$) и соответствующий обычному модулю $a_{одн}$.

4. Модуль упругой деформации при многократном загружении ($E_{упр.мн}$) и соответствующий ему $a_{упр.мн}$.

5. Модуль общей деформации при многократном нагружении $E_{мн}$ и соответствующий ему $a_{мн}$.

Рассчитываются соотношения $E_{упр}/E_{одн}$; $E_{одн}/E_{мн}$.

6.96. Исследования по 5 этапу рекомендуется выполнять при изучении грунтов, используемых в качестве строительных материалов для насыпных сооружений, с целью оценки параметров сжимаемости при заданных значениях их физического состояния, а также прогноза характеристик сжимаемости грунтов нарушенного сложения в условиях подтопления.

В тех случаях, когда образцы нарушенной структуры испытываются при плотности–влажности, соответствующих грунтам с естественным сложением, сопоставление данных по 1 и 5 этапам позволяет охарактеризовать влияние нарушения структуры на величину модуля общей деформации путем вычисления коэффициента

$$K^{E}_{стр} = E_{ест.стр}/E_{нар.стр}. \qquad (19)$$

В зависимости от целевых задач исследований могут быть испытаны:

образцы нарушенного сложения с плотностью и влажностью, соответствующими природным;

такие же образцы после замачивания без нагрузки или под арретиром;

образцы, уплотненные и замоченные под заданными нагрузками.

6.97. Компрессионные испытания, включая и модельные опыты, следует выполнять по ГОСТ 23908–79 с учетом следующих добавлений.

Испытания пылеватых грунтов слабой и средней степени уплотнения рекомендуется проводить ступенями давлений, равными: 0,005; 0,01; 0,025; 0,05; 0,1 МПа и далее по 0,05 МПа до заданного предела.

Для торфов рекомендуются следующие ступени нагрузок: 0,100; 0,250; 0,500; 1,00 и далее по 1,0 кгс/см^2 (или 0,01; 0,025; 0,050; 0,075; 0,1 и далее по 0,1 МПа).

Для исследуемых глинистых, пылеватых грунтов и гумусированных разновидностей этих пород должны быть определены: влажность по ГОСТ 5180–75, плотность по ГОСТ 5182–78, плотность частиц грунта по ГОСТ 5181–78, пределы пластичности по ГОСТ 5183–77, гранулометрический и микроагрегатный состав по ГОСТ 12536–79.

Для торфов дополнительно определяют степень разложения по ГОСТ 10650–72 и зольность по ГОСТ 11306–65 (с изм.1). Определение дисперсного состава этих грунтов выполняется комбинированным способом только при наличии специального задания.

Рекомендуется для всех типов грунтов, кроме волокнистых торфов, определять микроагрегатный состав и сопротивление пенетрации до и после окончания испытаний.

В связи с неоднородным распределением концентраций органического вещества в органогенных и органо-минеральных грунтах определение его содержания следует проводить в каждой испытуемой пробе по ГОСТ 23740–79. При испытании грунтов с повышенным содержанием окисного подвижного железа рекомендуется провести определение форм Fe до и после опыта. Пробы на анализ необходимо отбирать из естественно-влажных образцов: в первом случае при вскрытии монолита, во втором – из рабочего кольца прибора сразу же после окончания опыта.

КОМПРЕССИОННЫЕ ИСПЫТАНИЯ ПРОСАДОЧНЫХ ГРУНТОВ

6.98. Лессовые грунты Западной Сибири в условиях естественного залегания характеризуются макропористостью, высоким содержанием пылеватых и песчаных частиц (60–92 %), агрегированным состоянием глинистой фракции и неводноустойчивыми межагрегатными связями, что в совокупности обусловливает их способность к развитию при замачивании просадочных деформаций.

6.99. Согласно СНиП II-15-74 выделение просадочных разновидностей надлежит проводить учитывая степень влажности ($S_r < 0,8$) и значения коэффициента П. Проверка этих критериев и сопоставление с полученными экспериментально значениями относительной просадочности показывают их применимость для лессовых и лессовидных грунтов Томского и Тюменского Приобья.

6.100. Для оценки деформационного поведения при обводнении просадочных грунтов, кроме общих характеристик сжимаемости (a, E, $P_{стр}$), необходимо определять:

начальное просадочное давление $P_{пр}$, МПа/см^2 (СНиП II-15-74);

относительную просадочность $\delta^1_{пр}$ (СНиП II-15-74);

послепросадочную деформацию;

начальную просадочную влажность $W_{пр}$.

6.101. Начальное просадочное давление представляет то минимальное давление $P_{пр}$, при котором проявляются просадочные деформации грунта ($\delta^1_{пр} = 0,01$) в условиях полного водонасыщения.

6.102. Исследования просадочных грунтов рекомендуется проводить по полному или сокращенному комплексу общей схемы планирования эксперимента применительно к просадочным грунтам (рис. 28). Определение параметров сжимаемости, относительной просадочности и послепросадочной деформации при лабораторных исследованиях выполняется в компрессионных приборах по приведенным ниже схемам.

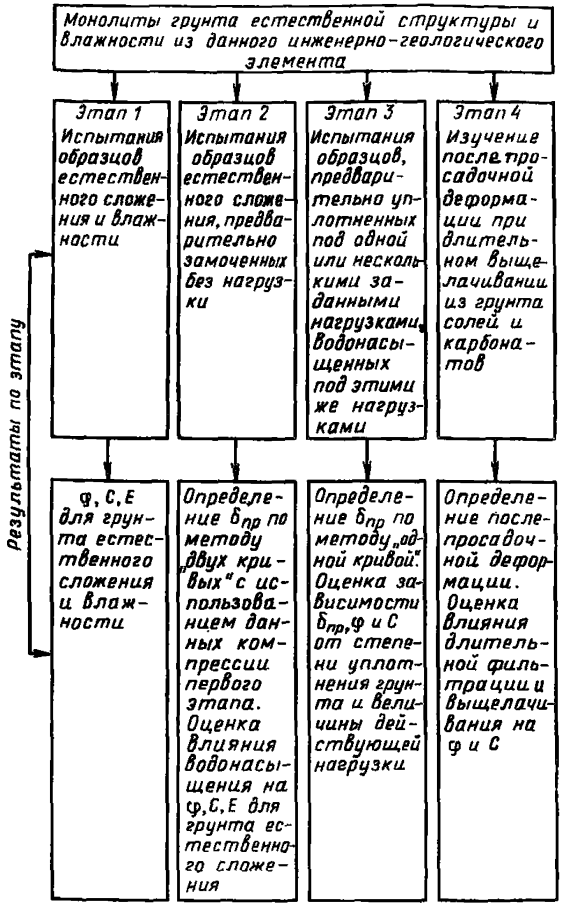
6.103. При реализации первого этапа испытываются образцы естественной плотности и влажности с целью определения E, a, $P_{стр}$ грунтов в природном состоянии до их замачивания.

6.104. По 2 этапу компрессионные опыты выполняются на предварительно водонасыщенных без нагрузки образцах. Сопоставление результатов по первой и второй схемам позволяет ориентировочно рассчитать $\delta^1_{пр}$ для различных ступеней нагрузок по методу "двух кривых".

Примечание. Применение метода "двух кривых" допускается для лессовых грунтов с числом пластичности $I_P \leq 0,17$, и нагрузках до 0,15–0,20 МПа (1,5–2,0 кгс/см^2). Показатели $\delta^1_{пр}$, определенные по этому методу, оказываются значительно завышенными.

6.105. Третий основной этап включает определение относительной просадочности по методу "одной кривой" и применяется для количественной оценки интенсивности просадочных явлений под заданными нагрузками. Для каждого предварительно выделенного просадочного слоя целесообразно определять зависимость относительной просадочности $\delta^1_{пр}$ от давления $P_{пр}$ в интервале нагрузок от бытовой до 2,0 кгс/см^2 или в интервалах, соответствующих заданию. Испытания проводят по следующей схеме: образец грунта естественного сложения помещают в компрессионный прибор и уплотняют ступенями нагрузок, рав-

Рис.28. Общая схема планирования эксперимента для просадочных грунтов



ными: 0,005; 0,01; 0,025; 0,05; 0,075; 0,01 и далее 0,05 МПа до заданного давления, прикладывая их через каждые 30 мин. После приложения полной величины давления образец выдерживается до условной стабилизации осадки, за которую принимается приращение деформаций не св. 0,01 за сут. Замачивание образца водой производится снизу при постоянном градиенте напора, не превышающем единицы, уровень воды в воронке поддерживается постоянным.

6.106. Развитие просадочной деформации сопровождается уплотнением грунта (плотность грунта в сухом состоянии при этом увеличивается). Однако, несмотря на повышение плотности, прочность лессовидных грунтов при замачивании под нагрузками, как правило, уменьшается, а грунты при этом нередко переходят в категорию слабых.

6.107. В условиях длительной фильтрации через карбонатные разновидности лёссовидных грунтов природных вод или агрессивных промстоков возможно развитие послепросадочных деформаций за счет растворения и выщелачивания водорастворимых солей и карбонатов, а также дополнительного разрушения образованных ими внутриагрегатных и межагрегатных связей.

Определение послепросадочных деформаций следует выполнять по методу "одной кривой" (4 этап). Замачивание образца грунта проводится до условной стабилизации послепросадочного уплотнения, но не менее, чем в течение 15 сут. За условную стабилизацию послепросадочного уплотнения принимается приращение осадки, не превышающее 0,01 мм за пять суток. Отсчеты по индикаторам (после стабилизации просадки) берутся два раза в сутки, в начале и в конце рабочего дня.

При изучении относительного послепросадочного уплотнения целесообразно проводить определение содержания солей в грунте до начала и после окончания испытаний.

6.108. Для количественной оценки просадочных явлений, возникающих на незастроенных участках при их обводнении, определение относительной просадочности и послепросадочных деформаций следует проводить по методу "одной кривой" на образцах естественного сложения при замачивании под давлением, равным природному.

Для прогноза величины просадки, которая может возникнуть при подтоплении грунтов, залегающих в основаниях сооружений, испытания выполняются на образцах предварительно уплотненных и водонасыщенных под нагрузкой, соответствующей проектному давлению.

Исследование относительной просадочности целесообразно проводить под несколькими нагрузками для выявления максимальной просадки.

6.109. Величины начального просадочного давления $p_{пр}$ при замачивании грунта не менее, чем до $S_r = 0{,}8$, в зависимости от его числа пластичности и относительной просадочности при давлении 0,3 МПа (3 кгс/см^2) определяются по формуле

$$p_{пр} = a/\delta_{пр(0{,}3\ МПа)} + b. \qquad (20)$$

Величины коэффициентов a и b в зависимости от диапазона числа пластичности I_p приведены в табл. 22.

Таблица 22

Число пластичности I_p	Значения коэффициентов	
	a	b
0,01–0,04	0,027	−0,001
0,04–0,07	0,0348	0,0016
0,07–0,10	0,045	0,005
0,10–0,20	0,057	0,009

Начальное просадочное давление $P_{пр}$ при влажности грунта, соответствующей $S_r < 0{,}8$, определяется по формуле

$$P_{пр}(W_i) = 0{,}216\, e^{\frac{0{,}46}{W_i}} P_{пр}. \qquad (21)$$

6.110. Начальная просадочная влажность грунта при различных давлениях определяется по следующей формуле:

$$W_{пр} = \frac{0{,}46}{\ln\left(4{,}62\,\frac{P_i}{P_{пр}}\right)}, \qquad (22)$$

где P_i – давление, при котором $\delta^s_{пр} = 0{,}01$ в условиях искомой величины начальной просадочной влажности.

6.111. Величины относительной просадочности при различных давлениях $\delta^s_{пр}(P_i)$ и влажности, соответствующей $S_r \geqslant 0{,}8$, определяются по исходной величине $\delta^s_{пр}$ 0,3 МПа (3 кгс/см^2) по формуле

$$\delta^s_{пр(P_i)} = \delta^s_{пр(0{,}3\,МПа)} \cdot K_{\delta^s_{пр}}, \qquad (23)$$

где $K_{\delta^s_{пр}}$ – переходный коэффициент, величина которого в зависимости от числа пластичности I_P и начального просадочного давления $P_{пр}$. Определяется по формулам табл.23.

6.112. Относительная просадочность при неполном водонасыщении определяется по формуле

$$\delta^s_{пр(P_i, W_i)} = 0{,}01 + \frac{W_i - W_{пр}}{W_в - W_{пр}}\,(\delta^s_{пр} - 0{,}01), \qquad (24)$$

где W_i – влажность грунта, при которой определяется $\delta^s_{пр}(P_i, W_i)$; $W_{пр}$ – начальная просадочная влажность, соответствующая давлению P_i; $W_в$ – влажность при $S_r = 0{,}8$–$0{,}9$; $\delta^s_{пр}$ – относительная просадочность при $S_r = 0{,}8$–$0{,}9$ и P_i.

Таблица 23

	Вид грунта	Значения переходных коэффициентов $K_{\delta^s_{пр}}$
1.	$I_P = 0{,}01 + 0{,}1$ $P_{пр} = 0{,}2 - 0{,}5$	$0{,}572\,P_i - 0{,}0795\,P_i^2$
2.	$I_P = 0{,}01 + 0{,}1$ $P_{пр} = 0{,}5 - 1{,}0$	$0{,}587\,P_i - 0{,}0624\,P_i^2 - 0{,}198$
3.	$I_P = 0{,}1 + 0{,}17$ $P_{пр} = 0{,}2 - 0{,}5$	$0{,}577\,P_i - 0{,}0666\,P_i^2 - 0{,}129$
4.	$I_P = 0{,}1 + 0{,}17$ $P_{пр} = 0{,}5 - 1{,}0$	$0{,}624\,P_i - 0{,}0585\,P_i^2 - 0{,}347$
5.	$I_P = 0{,}01 + 0{,}17$ $P_{пр} = 1{,}0 - 1{,}5$	$0{,}665\,P_i - 0{,}057\,P_i^2 - 0{,}478$
6.	$I_P = 0{,}01 + 0{,}17$ $P_{пр} = 1{,}5 - 2{,}0$	$0{,}459\,P_i - 0{,}39$
7.	$I_P = 0{,}01 + 0{,}17$ $P_{пр} = 2{,}0$	$1{,}32\,P_i - \sqrt{2{,}5 - 0{,}8\,P_i}$

КОМПРЕССИОННЫЕ ИСПЫТАНИЯ НАБУХАЮЩИХ ГРУНТОВ

6.113. В СНиП II-15-74 для предварительного выделения набухающих грунтов введен показатель П, равный отношению $П = \frac{e_L - e}{1 + e}$. Учитывая значения этого критерия, к категории "набухающих" при взаимодействии с водой следует относить глинистые грунты со значениями $П \geqslant 0{,}3$.

Для глинистых грунтов изученного региона показатель П составляет 0,001–0,01 (встречаются и отрицательные величины), что позволяет рассматривать эти породы как ненабухающие. Однако проведенные исследования показали, что среди грунтов Томского Приобья встречаются набухающие разности с величиной свободного относительного набухания до 0,17–0,21 и по классификации НИИОСП, относящиеся к средне- и сильнонабухающим. Таким образом, приведенные данные свидетельствуют о несоответствии между оценкой пород по критерию П и экспериментальной величиной свободного набухания и неприменимости данного критерия для условий Западной Сибири.

Показатель П характеризует, в основном, степень уплотнения грунта и не отражает его состава. Тогда как главными факторами, обусловливающими процесс набухания, являются дисперсность, минеральный состав грунтов, их ионно-солевой комплекс и характер структурных связей. На интенсивность процесса набухания оказывают влияние влажность, плотность грунта, а также его напряженное состояние.

Поэтому для данного региона предварительное выделение набухающих грунтов рекомендуется проводить по комплексу показателей, отражающих особенности их состава и структуры. При этом следует иметь в виду, что грунты с естественной структурой могут быть сцементированы аморфным кремнеземом, карбонатами, органическим веществом, окислами железа и т.п. и при увлажнении набухать не будут. Только после нарушения их естественного сложения они проявляют способность набухать. Учитывая это, определение свободного набухания рекомендуется проводить на образцах как естественной так и нарушенной структуры. В последнем случае величина относительного набухания у некоторых разновидностей пород возрастает вдвое и грунты из категории ненабухающих переходят в набухающие.

6.114. Для нефтегазоносных районов Западной Сибири к категории "набухающих" могут быть отнесены глинистые грунты с содержанием глинистых частиц, равным или более 45 % (при максимальной диспергации), с влажностью менее границы раскатывания и плотностью грунта в сухом состоянии, равной или св. 1,38 г/см^3, с обратимыми неводостойкими структурными связями.

Для оценки способности к набуханию грунтов, предварительно выделенных по комплексу показателей как "набухающие", определяют величину свободного относительного набухания $\sigma_н^с$.

За свободное относительное набухание $\sigma_н^с$ принимается деформация набухания грунта в условиях невозможного бокового расширения, без нагрузки. По величине свободного набухания, определенной в приборе ПНГ или в компрессионном приборе на образцах ненарушенного сложения, грунты классифицируются в соответствии с табл.24.

Таблица 24

Вид грунта	Величина свободного относительного набухания	
	в компрессионном приборе	в приборе ПНГ
Набухающие	⩾0,04	⩾0,07
Слабонабухающие	0,04–0,08	0,07–0,13
Средненабухающие	0,08–0,12	0,13–0,20
Сильнонабухающие	>0,12	>0,20

6.115. Определение свободного относительного набухания проводится в приборах ПНГ с высотой кольца 10 мм. Показания индикаторов после подачи воды регистрируют через 5, 10, 20, 30, 60 мин и далее через один час до конца рабочего дня, затем один раз в сутки. Опыт считается законченным, если показания индикатора в течение суток меняются не более чем на 0,05 мм.

Свободное относительное набухание рассчитывается по формуле:

$$\sigma_н^с = \frac{h_1 - h}{h}, \qquad (25)$$

где $h_1 - h$ – изменение высоты образца, определенное по показанию индикатора, мм; h – первоначальная высота образца, равная высоте режущего кольца прибора, мм.

6.116. Определение влажности грунта проводят по ГОСТ 5180–75. Для определения начальной влажности (до опыта) проба грунта отбирается из монолита (или естественно-влажного образца нарушенного сложения). Для определения влажности набухания пробу отбирают из набухшего грунта.

6.117. Величина свободного относительного набухания используется для предварительной оценки грунтов по их способности набухать. Так, грунты, характеризующиеся значениями свободного относительного набухания > 0,1 (при высоте кольца 10 мм), как правило, развивают давление набухания до 0,1 МПа (1 кгс/см^2) и св.

6.118. Для оценки деформационного поведения при обводнении набухающих разновидностей грунтов необходимо определить следующие характеристики: давление набухания – $P_н$ (СНиП II-15-74); влажность набухания $W_н$ (СНиП II-15-74);

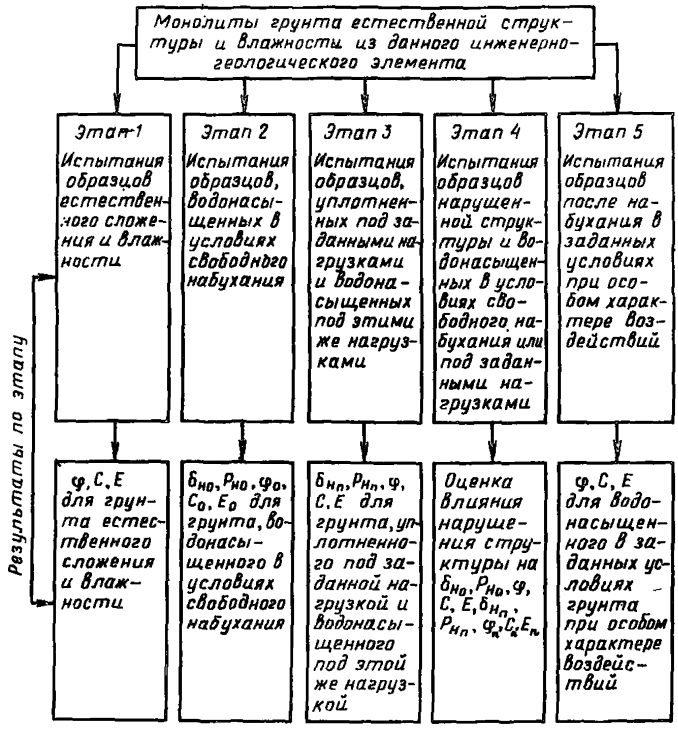


Рис.29. Общая схема планирования эксперимента для набухающих грунтов

относительное набухание под заданными нагрузками. Определение деформационных свойств набухающих грунтов и показателей, характеризующих их способность набухать, рекомендуется проводить, руководствуясь схемой, приведенной на рис. 29.

Величину давления набухания $P_н$ следует определять в специально сконструированных компрессионных приборах.

6.119. При проведении испытаний в компрессионном приборе для оценки величин $P_н$ рекомендуется метод "компенсирующих нагрузок". Опыт заключается в следующем.

К помещенному в одометр образцу грунта одновременно с замачиванием прикладываются нагрузки, уравновешивающие силы набухания, ступенями по 0,02–0,05 МПа/см^2 для грунтов тугопластичной консистенции, и по 0,05–0,1 МПа/см^2 для грунтов полутвердой и твердой консистенции с интервалом в 15 мин. Деформация набухания при этом не должна превышать 0,01 мм.

Давление, при котором будет зафиксирована осадка грунта, не превышающая 0,02 мм, принимается за величину давления набухания.

6.120. Для последующего уточнения величины давления набухания следует применить схему "деформация относительного набухания под уплотняющими нагрузками ". Уплотняющие нагрузки подбираются таким образом, чтобы они отличались от полученной экспериментальной величины давления набухания на 0,05–0,1 МПа (0,5 или 1,0 кгс/см^2).

6.121. Для грунтов, залегающих в зоне переменного увлажнения, определение давления набухания целесообразно проводить при нескольких значениях влажности, соответствующих сезонным изменениям этого показателя. Для оценки влияния фактора структурности на значения показателей $\sigma_н$; $P_н$; $W_н$ опыты следует проводить и на образцах нарушенной структуры с заданными значениями плотности–влажности.

6.122. Для оценки проведения в условиях замачивания грунтов оснований целесообразно проводить насыщение грунта под давлением, соответствующим проектному или испытываемой грунтом нагрузке от конкретного сооружения (3 этап исследований).

Опыт выполняется по следующей схеме: образец грунта с природной плотностью и влажностью помещается в компрессионный прибор и уплотняется ступенями нагрузок, равными 0,02–0,05 МПа/см^2 приложением каждой ступени давлений через 15 мин. Конечная нагрузка удерживается до условной стабилизации деформации. Если опыт проводился на нескольких образцах-близнецах, уплотненных и замоченных под разными нагрузками, по результатам испытаний строят график зависимости величины относительного набухания от давления P.

6.123. При необходимости определения компрессионных характеристик, после набухания грунта испытания проводят по следующей схеме:

образец с естественной структурой природного сложения и влажности (или с нарушенной структурой при заданных значениях плотности–влажности) помещается в прибор и капиллярно водонасыщается в соответствии с требованиями ГОСТ 23908–79. Затем заливается водой и выдерживается в таком состоянии до стабилизации набухания. За условную стабилизацию деформации набухания следует принимать деформацию, не превышающую 0,01 мм за 24 ч.

Предварительно набухающей образец грунта уплотняют небольшими нагрузками по 0,01–0,025 МПа/см^2 до давления 0,1 МПа/см^2, далее ступенями по 0,05 МПа до заданного предела. Каждую ступень нагрузки выдерживают в соответствии с требованиями ГОСТ 23908–79.

По результатам испытаний рассчитывают коэффициент компрессии a и модуль общей деформации E.

ОЦЕНКА ИЗМЕНЕНИЯ ПРОЧНОСТНЫХ СВОЙСТВ ГРУНТОВ ПРИ ПОДТОПЛЕНИИ

6.124. Дополнительное водонасыщение грунтов природными водами или промстоками способствует утолщению диффузных оболочек глинистых частиц, вызывает размягчение и разрушение цементационных структурных связей, обусловливая самопроизвольную диспергацию природных агрегатов или компактную коагуляцию дисперсных частиц. Эти процессы, а также изменение напряженного состояния в массиве, происходящее вследствие гидростатического и гидродинамического взвешивания грунта при подъеме уровня подземных вод, оказывают влияние на прочностные свойства грунтов. Результаты экспериментальных исследований показывают, что после взаимодействия с водой или водными растворами сопротивление сдвигу практически всех рассматриваемых типов грунтов существенно снижается. Поэтому для прогноза изменения несущей способности грунтовых оснований в условиях их подтопления или замачивания необходима достоверная оценка происходящего при этом изменения их прочностных характеристик.

6.125. При выборе методики испытаний для определения прочностных характеристик структурно-неустойчивых грунтов необходимо учитывать влияние консолидации и напряженного состояния, а также длительности и характера действующих нагрузок на значения получаемых показателей. Для получения прогнозных значений сопротивляемости сдвигу в ожидаемых при строительстве условиях необходимо, чтобы условия проведения испытаний по возможности адекватно моделировали структуру и напряженное состояние грунта на площадке изысканий к моменту ее подтопления.

ПРОВЕДЕНИЕ ИСПЫТАНИЙ НА ОДНОПЛОСКОСТНЫХ СРЕЗНЫХ ПРИБОРАХ

6.126. Испытания в одноплоскостных срезных приборах производят по ГОСТ 12248–78 с учетом следующих добавлений:

1. Время предварительного замачивания грунта следует назначать с учетом продолжительности развития предлагаемых при обводнении грунтов физико-химических процессов. Так, например: интенсивность влияния на прочностные свойства грунтов процесса оглеения зависит от времени его действия, поэтому предварительное замачивание образцов следует проводить в условиях герметизации не менее 7–10 дней, предохраняя грунт от соприкосновения с кислородом воздуха.

2. Для оценки влияния на сопротивление грунтов срезу не восстанавливающихся после разрушения структурных связей рекомендуется методика повторного сдвига способом "плашки по плашке". Метод заключается в том, что после выполнения основного испытания подвижную каретку прибора возвращают

в исходное положение и осуществляют повторный срез. Значение $C_{стр}$ находят как разность между значением удельного сцепления при однократном сдвиге и величиной C, получаемой при повторном опыте.

3. Для прогноза изменения параметров сдвига при различной степени консолидации грунтов, в условиях полного водонасыщения, рекомендуется схема испытания плотности–влажности (методика выполнения опыта подробно изложена в Методическом пособии по определению физико-механических свойств грунтов. М., изд. "Недра" 1975).

6.127. Сдвиговые испытания грунтов, не проявляющих способности к набуханию и просадкам, выполняют по полной или сокращенной программе схемы, представленной на рис.27.

На 1 этапе исследуются образцы в природном состоянии, которое соответствует грунтам до развития процессов подтопления. Испытания выполняют по методике неконсолидированного сдвига. Полученные результаты используют при установлении нормативных показателей по ГОСТ 20522–75 для грунтов с естественной влажностью.

6.128. На 2 этапе испытываются образцы, предварительно водонасыщенные до состояния полной влагоемкости. Испытания рекомендуется проводить по методике неконсолидированно-недренированного или неконсолидированно-дренированного среза.

Полученные результаты позволяют оценить значения C и φ после подтопления на незастроенных участках или в начальный момент строительства.

6.129. На 3 этапе определяют прогнозные значения параметров сдвига после обводнения грунтовых оснований, консолидированных под давлением от сооружения.

Испытания выполняют на образцах, предварительно уплотненных заданными нагрузками и водонасыщенных под этими же нагрузками.

В зависимости от рассчитанных значений степени консолидации грунтов на площадке изысканий к началу ее подтопления грунтовыми водами испытывают:

образцы, предварительно уплотненные заданной статической нагрузкой до условной стабилизации деформации сжатия в соответствии с требованием ГОСТ 12248–78;

образцы, уплотненные статической нагрузкой до заданной плотности, моделирующей структуру грунта в состоянии незавершенной консолидации в определенный момент времени.

Замачивание образцов предпочтительно производить взаимодействующими с грунтами водами, даже если они пресные.

В соответствии с целевыми задачами исследования испытания на сдвиг по этой схеме выполняются по методике консолидированно-недренированного или консолидированно-дренированного среза быстрого или ускоренного.

6.130. Определение сопротивления срезу просадочных грунтов в естественных условиях залегания и после их замачивания рекомендуется проводить по полной или сокращенной схеме планирования эксперимента (см. рис. 28) в соответствии с задачами исследований и требованиями к методике проведения испытаний установленных ГОСТ 12248–78.

6.131. Испытания образцов природной плотности и влажности (по 1 этапу) рекомендуется проводить по методу ускоренного неконсолидированно-дренированного среза.

Нормальные давления принимаются в зависимости от консистенции грунта и нагрузки на фундаменты.

Для некарбонатных разновидностей лессовидных грунтов, характеризующихся слабой и средней степенью уплотнения, вертикальные нагрузки следует принимать равными 0,010; 0,025; 0,05; 0,1 МПа.

Для лессов и карбонатных лессовидных суглинков в зависимости от плотности и консистенции, нормальные давления могут составлять 0,025; 0,05; 0,075; 0,1; 0,15; 0,2 МПа.

Ступени касательных напряжений и режим их приложения при проведении среза устанавливаются в соответствии с требованиями ГОСТ 12248–78.

6.132. После взаимодействия с водой большинство разновидностей лессов и лессовидных грунтов переходят в категорию слабых, при этом происходит изменение консистенции этих пород до текучего или текучепластичного состояния и резко снижается их прочность.

Для оценки и прогноза прочностных характеристик на незастроенных участках после их подтопления испытывают образцы предварительно водонасыщенные в условиях свободного набухания. Следует учитывать, что некоторые разновидности лессовых грунтов Томского Приобья при водонасыщении без нагрузки проявляют слабую способность набухать.

Вертикальные нагрузки при срезе водонасыщенных лессовых и лессовидных грунтов принимаются такими же, как при испытаниях грунтов текучей консистенции, для некарбонатных разновидностей: 0,01; 0,025; 0,05 МПа, для карбонатных грунтов: 0,025; 0,050; 0,075 МПа.

6.133. Для прогноза изменения несущей способности грунтов после развития просадочной деформации испытания на срез выполняются на образцах предварительно уплотненных под заданным нагрузками и водонасыщенных под этими же нагрузками.

Предварительное уплотнение и насыщение образцов водой проводят в соответствии с требованиями ГОСТ 12248–78.

Нагрузки на образец передаются ступенями, равными 0,01–0,025 МПа до заданного давления, прикладывая их через каждые 30 мин. После приложения полной нагрузки образец выдерживается до условной стабилизации осадки образца не св. 0,01 мм

за 16 ч. Подготовленные образцы испытывают методом ускоренного или быстрого сдвига.

6.134. Для оценки прочности лессовых грунтов после развития послепросадочных деформаций, испытываются образцы, структура и состояние которых соответствуют завершению послепросадочного уплотнения, происшедшего в результате растворения и выноса карбонатов и солей под влиянием агрессивных вод.

6.135. Для получения прогнозных характеристик прочности набухающих грунтов в ожидаемых условиях увлажнения и напряженного состояния рекомендуются схемы, приведенные на рис.29.

6.136. Оценку прочности грунтов на незастроенных территориях после их подтопления можно получить определяя сопротивление срезу образцов, предварительно водонасыщенных в условиях свободного набухания или после набухания под нагрузкой, соответствующей природной.

6.137. Для прогноза параметров сдвига после подтопления грунтов, консолидированных под нагрузкой от сооружения, проводятся испытания образцов, уплотненных и водонасыщенных под заданной нагрузкой (в ходе уплотнения и замачивания возможно набухание грунта и его уплотнение).

Замачивание образцов производят до условного прекращения набухания (или уплотнения), принимаемого равным 0,1 мм за 24 ч.

Грунты пластичной консистенции уплотняются ступенями нагрузок по 0,025 МПа (0,25 кгс/см^2), которые прикладывают через 24 ч. Последнюю нагрузку выдерживают до условной стабилизации деформации не св. 0,01 мм за 16 ч. При уплотнении тугопластичных грунтов ступени нагрузок могут быть увеличены до 0,05 МПа (0,5 кгс/см^2).

6.138. Степень влияния процесса подтопления на прочностные характеристики грунтов на площадке изысканий устанавливают вычислением коэффициентов по соотношениям, приведенным в п.6.48.

ПРОВЕДЕНИЕ ИСПЫТАНИЙ В УСЛОВИЯХ ТРЕХОСНОГО СЖАТИЯ

6.139. Грунты, залегающие в основаниях сооружений и в природных условиях, находятся в трехосном напряженном состоянии. Поэтому для экспериментального моделирования такого состояния грунта в лаборатории применяются приборы трехосного сжатия (стабилометры). Преимуществом трехосных испытаний для исследования физико-механических свойств грунтов и прогноза изменения последних в обстановке, создаваемой строительством, является возможность воспроизведения напряженного состояния, свойственного грунтам в натурных услови-

ях, определение характеристик прочности и деформируемости на одних и тех же образцах, проведение опытов в разных условиях дренирования и т.п. При исследовании сжимаемости грунтов в стабилометрах силы трения образца по его боковой поверхности практически отсутствуют, что повышает точность оценки деформационных характеристик.

6.140. Описание конструкции современных стабилометров и методика проведения в них опытов даны в монографии Н.Н. Сидорова и В.П. Сипидина "Современные методы определения характеристик механических свойств грунтов" Л.„Стройиздат, 1972.

6.141. Рекомендуемое испытание на стабилометре отдельного образца проводится в два этапа:

постепенное увеличение всестороннего давления на образец до уровня, соответствующего выбранному значению бокового давления;

увеличение вертикального сжимающего напряжения σ_1 при фиксированном выбранном значении бокового давления $\sigma_2 = \sigma_3$.

Результаты испытания представляются графиком зависимости $\lambda = f(\sigma_1)$, где λ – вертикальная относительная деформация.

6.142. По результатам отдельного опыта устанавливаются:

предельное вертикальное напряжение σ_1^*;

модуль деформации при выбранном значении бокового давления, определяемый по формуле

$$E_{\sigma_3} = \frac{\Delta \sigma_1}{\Delta \lambda_1}, \qquad (26)$$

где σ_1 и $\Delta\lambda_1$ – интервалы давления и деформации, взятые в пределах линейной части графика зависимости $\lambda_1 = f(\sigma_1)$, соответствующей 2-му этапу испытания.

Результаты отдельного опыта могут быть обработаны также в координатах $(\sigma_1 - \sigma_3) - \lambda_1$, с исключением 1-го этапа испытания. В этом случае модуль деформации определяется по соотношению

$$E_{\sigma_3} = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)_{лин}}{\lambda_{1\,лин}}. \qquad (27)$$

6.143. Определение σ_1^* и $E\sigma_3$ следует проводить не менее чем при трех различных значениях σ_3 на образцах грунта, вырезанных из одного однородного по строению и составу монолита или, в необходимых случаях, подготовленных в лаборатории.

Значения σ_3 должны выбираться в зависимости от глубины отбора монолитов, их состояния и задач исследования, как правило, в интервале 0,05–0,3 МПа. В отдельных специальных случаях могут быть приняты меньшие или большие боковые давления.

6.144. При выборе режима испытания (консолидированный, неконсолидированный) следует исходить из рекомендаций

ГОСТ 12248–78. При оценке влияния различных геотехнических факторов на прочность и сжимаемость грунтов в качестве основного рекомендуется принимать режим неконсолидированно-недренированного (НН) или консолидированно-недренированного (КН) сдвига.

6.145. По величинам предельного сжимающего напряжения σ_1^*, относящимся к монолитам, отобранным из одного инженерно-геологического элемента, следует устанавливать нормативные и расчетные значения прочностных характеристик грунта – угла внутреннего трения φ и удельного сцепления C.

Обработка данных проводится согласно ГОСТ 20522–75 на базе условия прочности Кулона–Мора, записываемого в главных компонентах напряжений:

$$t = H + S\,tg\beta, \qquad (28)$$

где величины H и $tg\beta$ связаны с параметрами прочности соотношениями:

$$\left.\begin{aligned} H &= C\cos\varphi; \\ tg\beta &= \sin\varphi, \end{aligned}\right\} \qquad (29)$$

t и S – функции главных напряжений, соответствующие предельному состоянию, определяемые соотношениями:

$$t = 1/2\,(\sigma_1^* - \sigma_3);$$

$$S = 1/2\,(\sigma_1 + \sigma_3). \qquad (30)$$

При обработке устанавливаются нормативные и расчетные значения $H^н$; $tg\,\beta^н$; $H^р$; $tg\,\beta^р$, а по ним на основе соответствующих соотношений определяются нормативные и расчетные значения $\varphi^н$; $C^н$; $\varphi^р$; $C^р$.

6.146. Обработка индивидуальных значений E_{σ_3}, получаемых в отдельном испытании по формуле (26), производится в соответствии с ГОСТ 20522–75 на основе линейного соотношения

$$E = E_0 + \sigma_3\,tg\alpha, \qquad (31)$$

где E_0 – значение модуля деформации при $\sigma_3 = 0$; $tg\alpha$ – параметр, характеризующий нарастание модуля деформации с ростом σ_3.

Расчетные значения E_0 и $tg\,\alpha$ определяются по ГОСТ 20522–75 при значениях коэффициента безопасности по грунту $K_г = 1$ и используются для определения модуля деформации как функции напряженного состояния, характеризуемого боковым давлением σ_3.

Примечание. Приведенные в разд. 2 данные по $tg\,\alpha$ определены, исходя из соотношений

$$tg\,\alpha = \frac{E_2 - E_1}{2 - 1} = E_2 - E_1$$

или

$$tg\,\alpha = \frac{E_{1,5} - E_{0,5}}{1,5 - 0,5} = E_{1,5} - E_{0,5}$$

в зависимости от системы боковых давлений, которая была принята при проведении опытов.

В дополнение к ГОСТ 20522–75 при обработке данных следует вычислить коэффициент корреляции и проверить его значимость.

6.147. Экспериментальное моделирование осуществляется на основе общей схемы планирования экспериментов, представленной на рис.27.

При использовании метода факторного планирования на 3 этапе в качестве независимых переменных, или факторов, следует принимать:

параметр напряженного состояния – боковое давление в камере стабилометра $x_1 = \sigma_3$;

параметр, определяющий состояние грунта по плотности – плотность сухого грунта $x_2 = \rho_d$;

параметр, определяющий состояние по влажности – влажность или степень влажности $x_3 = W$ или $x = G$.

В качестве уравнения, связывающего значение определяемого в опыте показателя – "выхода" со значениями факторов, как первое приближение рекомендуется использовать линейную модель

$$y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 . \qquad (32)$$

При необходимости также могут быть учтены эффекты взаимодействия факторов.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ГРУНТОВ ПРИ ВИБРОДИНАМИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ

6.148. Если освоение территорий сопровождается передачей на грунты основания вибродинамических воздействий (от буровых и нефтеперерабатывающих установок, транспорта и т.д.), то экспериментальное моделирование должно включать определение количественных показателей снижения прочности и увеличения сжимаемости, вычисляемых по соотношению

$$K^A_{дин} = \left(1 - \frac{A_{дин}}{A_{ст}}\right) \cdot 100$$

для следующих характеристик:

φ – угол внутреннего трения; C – удельное сцепление; E – модуль деформации.

6.149. Указанный этап исследования рекомендуется реализовать на установках трехосного сжатия, обеспечивающих возможность создания на испытываемый образец вибродинамических воздействий, – вибростабилометрах. Применение этих приборов позволяет наиболее полно моделировать напряженно-деформированное состояние грунтов оснований и обеспечивает единство

методики испытаний при статических и динамических воздействиях.

6.150. Конструкция применяемого вибростабилометра должна удовлетворять следующим требованиям:

обеспечение пределов изменения вибродинамических воздействий, передаваемых на образец в интервале, соответствующем интервалу их изменения в натурных условиях;

возможность независимого регулирования вертикального и горизонтального главных напряжений;

исключение возможности появления местных напряжений в образце в местах его контакта с нагрузочными устройствами при передаче вибродинамического воздействия образцу;

возможность регистрации колебаний минеральных частиц грунта непосредственно в приборе;

постоянство действующей нагрузки, передаваемой образцу грунта при различных режимах работы в течение определенного промежутка времени;

возможность передачи на образец одновременно с вибродинамической статической нагрузки;

возможность испытания только при статической нагрузке, для обеспечения возможности сопоставления результатов с получаемыми на обычных стабилометрах.

Перечисленным требованиям удовлетворяют установки, в основу работы которых положен принцип воздействия периодическим изменением бокового давления (вибростабилометры ЛПИ им. М.И. Калинина, ЛИИЖТ им. академика В.Н. Образцова и др.). В пункте 6.159 дана конструкция вибростабилометра, сконструированного и изготовленного в ЛИИЖТ. Там же указан порядок сборки установки и подготовки ее к работе.

6.151. Размеры образцов для испытаний на вибростабилометре должны соответствовать размерам образцов, испытываемых при статических нагрузках и быть, как правило, не менее: $d = 4$ см; $h = 6$ см. Вырезка образца из монолита осуществляется специальным шаблоном. Приготовление образцов песчаных и глинистых грунтов нарушенного сложения с заданными значениями объемного веса и влажности следует осуществлять в соответствии с методикой, изложенной в ГОСТ 12248–78.

6.152. Параметрами вибродинамического воздействия на испытываемый образец грунта являются:

ν, ω – частота пульсации бокового давления (или циклическая частота, ω, рад/с), связанная с числом оборотов эксцентрика в минуту известными соотношениями:

$$\nu = n/60; \quad (33)$$

$$\omega = 2/60; \quad (34)$$

n – амплитудное значение пульсации бокового давления $\sigma_д$. Величина $\sigma_д$ зависит от двух групп факторов: 1 – свойств и состояния испытываемого образца; 2 – параметров установки.

В рекомендуемой конструкции вибростабилометра (см. прил. 1) ко второй группе относятся два параметра: выходной диаметр отверстия патрубка $d_п$, по которому вода поступает в камеру, и эксцентриситет эксцентрика $э$. Конструкция установки обеспечивает возможность замены указанных деталей другими для обеспечения требуемого вибродинамического воздействия. Свойства грунта при этом оцениваются ориентировочно, на основе предварительной информации о влиянии состояния грунтов на величину $\sigma_д$ для данной комбинации ($d_п$, $э$). Поэтому практически всегда имеется расхождение между предварительно выбранной величиной $\sigma_д^{пр}$ и фактически зафиксированной в опыте $\sigma_д^{ф}$. Соответствующая погрешность должна удовлетворять условию

$$\sigma_д' = \left| \frac{\sigma_д^{пр} - \sigma_д^{ф}}{\sigma_д^{ф}} \right| 100 \leq 10-15\%. \qquad (35)$$

Далее обозначается $\sigma_y^{ф} = \sigma_д$ – фактически зарегистрированное в опыте амплитудное значение пульсации давления.

6.153. При испытаниях на вибростабилометрах выбору подлежат:

метод испытания, определяемый скоростью загружения (всесторонним, а затем вертикальным давлением) и режимом дренирования;

боковое давление в камере стабилометра $\sigma_3^{ст}$;

параметры вибродинамического воздействия $\sigma_д$, ω.

6.154. Метод испытания на вибростабилометре должен быть увязан с методом испытания при статической нагрузке. В качестве основного для определения степени снижения показателей по характеристикам прочности рекомендуется метод неконсолидированно-недренированного сдвига (методика условно-мгновенного разрушения образцов), а по характеристикам сжимаемости – неконсолидированно-недренированного или консолидированно-недренированного сдвига.

6.155. Испытания образцов на вибростабилометре рекомендуется проводить при боковых давлениях для условий статического нагружения.

6.156. Параметры вибродинамической нагрузки $\sigma_д$, ω должны приниматься на основе анализа характера моделируемых воздействий в натурных условиях.

При испытании образцов, относящихся к одному инженерно-геологическому элементу, указанные параметры не зависят от бокового давления $\sigma_3^{ст}$.

6.157. Величины $\sigma_3^{ст}$; $\sigma_д$, ω определяют полное боковое давление в камере стабилометра в любой момент времени по соотношению:

$$\sigma_3 = \sigma_3^{ст} + \sigma_д \sin \omega t. \qquad (36)$$

6.158. Испытание на вибростабилометре включает следующие этапы: увеличение всестороннего давления в камере до величины $\sigma_3^{ст}$, в соответствии с принятым режимом испытания;

создание пульсации бокового давления;

увеличение вертикального давления на образец вплоть до его разрушения.

Результатом отдельного опыта являются осциллограммы вертикальной деформации образца и пульсации бокового давления. По осциллограмме вертикальной деформации строится график зависимости вертикальной относительной деформации λ_1 от вертикального давления σ_1^A. Зависимость $\lambda_1 = f(\sigma_1^A)$ используется для определения параметров прочности φ, C и сжимаемости при вибродинамических воздействиях аналогично положениям, изложенным в разд. 3.

Пример обработки осциллограммы вертикальной деформации испытанного образца дан в п.6.160.

Конструкция вибростабилометра, порядок подготовки его к работе

6.159. Конструкция вибростабилометра ЛИИЖТ показана на рис.30. Установка состоит из трех основных узлов; обычного

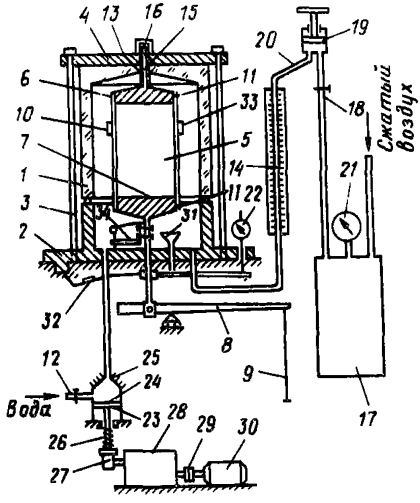


Рис.30. Схема установки для исследования влияния динамической нагрузки на грунты

1 – съемная камера; 2 – столик чаши; 3 – стяжные болты; 4 – траверса; 5 – образец испытываемого грунта; 6 – поршень; 7 – нагрузочный поршень; 8 – рычаг; 9 – подвеска для гирь; 10 – резиновая оболочка; 11 – кольца для уплотнения; 12 – запорный кран; 13 – верхний шток; 14 – визирная трубка; 15 – канавка для отжатия воздуха; 16 – заглушка; 17 – ресивер; 18 – кран для подачи воздуха; 19 – плавающий плунжер; 20 – трубопровод; 21 и 22 – манометры; 23 – поршень; 24 – мембрана; 25 – обойма; 26 – шток; 27 – эксцентрик; 28 – редуктор; 29 – гибкая муфта; 30 – электродвигатель генератора колебаний; 31 и 32 – датчики для измерения пульсации бокового давления; 33 – датчик горизонтальной составляющей колебаний; 34 – датчик вертикальной составляющей колебаний

стабилометра ЛИИЖТ типа А генератора колебаний, комплекса аппаратуры и приборов для измерения и регистрации колебаний и процесса деформирования грунта.

Подготовка установки к работе и ее сборка осуществляются в следующей последовательности. Образец испытываемого грунта *5* вместе с переносным поршнем *6* посредством специального приспособления помещается в тонкую резиновую оболочку *10*. Эта операция осуществляется на столике установки, после чего приспособление вместе с грунтом и поршнем *6*, при отогнутых концах резиновой оболочки, устанавливается на нагрузочный поршень *7*. Затем концы резиновой оболочки последовательно отгибаются на верхний и нижний поршни и уплотняются специальными кольцами *11* при условии отсутствия воздуха между грунтом и оболочкой. После этого на образец грунта устанавливается датчик *33* для регистрации горизонтальной составляющей колебаний частиц грунта.

Герметически уплотненная рабочая зона установки с помощью стяжных болтов *3* и траверсы *4* образуется из съемной камеры *1*, выполненной из оргстекла и жестко закрепленной на столике чаши *2*.

Образец грунта вместе с поршнями *6* и *7* перемещается в крайнее нижнее положение, которое фиксируется верхним упорным штоком *13*. Рабочая камера стабилометра заполняется дистиллированной водой через входной кран *12*. Поступающая снизу в камеру рабочая жидкость отжимает воздух в атмосферу через канавку *15* в верхнем упорном штоке *13*. Одновременно жидкость поступает в трубопровод, соединяющий визирную трубку *14* с рабочей зоной стабилометра (визирная трубка позволяет регистрировать объемные деформации грунта с точностью до 0,1 %).

Когда вся рабочая зона установки заполнится водой и последняя через канавку *15* появится на траверсе *4*, входной кран *12* перекрывается, накручивается заглушка *16*, после чего осторожно открывая запорный кран *12*, добиваются установления необходимого уровня рабочей жидкости в визирной трубке *14*. Боковое давление создается сжатым воздухом, находящимся в ресивере *17*. При открытом кране *18* воздух поступает в камеру плавающего плунжера *19*, поднимает его в крайнее верхнее положение и по трубопроводу *20* поступает в визирную трубку *14*. На контакте воздуха и рабочей жидкости давление передается на жидкость, и в рабочей камере создается всестороннее гидростатическое давление, которое фиксируется манометром *21*.

Перемещение минеральных частиц образца грунта вызывается периодическим изменением бокового давления посредством генератора колебаний, который представляет собой своеобразную приставку к стабилометру и служит для создания пульсации бокового давления в рабочей камере установки. При действии статического бокового давления включается электро-

двигатель *30*, соединенный через гибкую муфту *29* с редуктором *28*, позволяющим получать на выходном валу скорость вращения 360–7000 об/мин, что соответствует частоте воздействия 6–117 Гц. Коэффициент редуцирования, т.е. отношение двух ближайших скоростей вращения выходного вала, составляет 1,5. На выходном валу редуктора установлен эксцентрик *27*, который преобразует вращательное движение вала в поступательные циклические перемещения штока *26*. Возврат штока происходит под воздействием специально установленной на нем пружины. При движении вверх поршень *23* воздействует на мембрану *24*, герметически уплотненную по окружности обоймы *25*, создавая дополнительное давление в рабочей камере установки, которое превышает боковое на некоторую величину. Перемещение поршня вниз и соответствующее уменьшение бокового давления на ту же величину происходит под действием возвратной пружины. Повышение давления вызывает деформацию грунта в радиальном направлении, а понижение устраняет деформации, так как изменение давления задается по величине таким, что вызываемые им перемещения в основном являются упругими. Появление и исчезновение деформаций соответствует ходу поршня вверх-вниз, а их величина определяет двойную амплитуду перемещения частиц грунта, которые возникают по всей поверхности образца. Для предотвращения в процессе колебаний отрыва поршня от образца и ликвидации таким образом местных напряжений в грунте оба поршня демпфированы рабочей жидкостью, постоянно находящейся под действием давления сжатого воздуха.

Величина пульсации бокового давления обусловливается диаметром выходного отверстия патрубка визирной трубки *14* и эксцентриситетом эксцентрика *27*. Названные детали легко устанавливаются и снимаются, что позволяет заменить их другими для получения требуемого вибродинамического воздействия.

Для измерения перемещений (колебаний) грунта непосредственно в рабочей камере в установку введены малогабаритные датчики, предназначенные для измерения соответственно горизонтальной *33* и вертикальной *34* составляющих амплитуд колебаний частиц грунта, а также датчики *31* и *32* – соответственно для измерения пульсации бокового давления и вертикальной деформации. Датчик горизонтальной составляющей колебаний *33* представляет собой эллипсообразную стальную плоскую пружину с наклеенной тензорешеткой. Пружина устанавливается непосредственно на образец и при повышении бокового давления вместе с грунтом перемещается в радиальном направлении, а при понижении давления на величину пульсации ΔP – возвращается в исходное положение. Эти перемещения преобразуются тензорешеткой в электрическую величину и осциллографи-

руются; после расшифровки определяется истинная величина колебаний.

Датчик вертикальных колебаний 34 представляет собой малогабаритный виброметр, который крепится двумя хомутиками на подвижном штоке стабилометра.

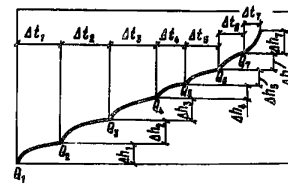
Для записи процесса развития вертикальной деформации в зависимости от действующих напряжений в схему введен специальный датчик *32*. Он выполнен в виде балочки, на которую наклеены тензорешетки. Одним концом балочка жестко закреплена на подвижном штоке стабилометра, а второй ее конец свободен, но его вертикальные перемещения ограничены специальной площадкой. При деформации образца грунта вместе с поршнем перемещается и жестко закрепленный на нем конец балочки, в результате чего она изгибается. Процесс изгиба осциллографируется, а затем по показаниям осциллограммы и тарировочной зависимости устанавливается истинная величина вертикальной деформации образца. Величина пульсации бокового давления регистрируется датчиком *31*, который работает по принципу приборов мембранного типа с использованием датчиков омического сопротивления. Жесткость мембраны и основания, на которое она крепится, практически несоизмеримы, что позволяет не учитывать деформации основания под действием бокового давления. Толщина мембраны подобрана так, что при всех величинах применяемых нагрузок зависимость деформации мембраны от давления является прямолинейной.

ПОРЯДОК ИСПЫТАНИЯ И ПРИМЕР ОБРАБОТКИ ВЕРТИКАЛЬНОЙ ДЕФОРМАЦИИ ОБРАЗЦА И ИЗМЕНЕНИЯ БОКОВОГО ДАВЛЕНИЯ В КАМЕРЕ СТАБИЛОМЕТРА

6.160. Образец грунта *5* в резиновой оболочке *10* помещается в камеру стабилометра, которая заполняется водой. Всестороннее давление в камере создается через воду сжатым воздухом, находящимся в ресивере *17*, что позволяет предотвратить гидравлический удар на образец. При действии статического бокового давления включается электродвигатель генератора колебаний *30*, который вызывает периодическое изменение бокового давления с заданной частотой. Далее включается осциллограф, связанный с датчиком *32*, для фиксации вертикальных деформаций и сразу прикладываются ступени вертикальной нагрузки

Дата и время испытания	№ монолита и образца	Вид нагрузки, значения параметров ω и $\sigma_д$	Боковое (всестороннее) давление $\sigma_з$, МПа	Номер ступени вертикальной нагрузки, i

Рис.31. Осциллограмма вертикальной деформации



на подвеску *9* рычага *8*. На ленте осциллографа регистрируется график нарастания деформации грунта в зависимости от действующих нагрузок (рис. 31).

Результаты опыта записываются по форме, указанной в табл. 25.

Цифровое значение гр. 7 табл.25 находится умножением величины ступени нагрузки на соотношение плеч рычага (0,7х9,55 = = 6,68). Вертикальная деформация образца (гр. 3) рассчитывается следующим образом. Берется лента осциллограммы и замеряется расстояние от края ленты до линии осциллограммы, соответствующей началу опыта (без приложения вертикальной нагрузки); пусть, например, это расстояние равно 17,5 мм. Далее на ленте отмечается конец деформации от первой ступени нагрузки и замеряется расстояние от края ленты до этой точки; например, оно равно 23,5 мм. Разница между этими двумя замерами составляет 6 мм. При тарировке установлено, что 1 мм осадки соответствует 8,9 мм на осциллограмме; следовательно, $\Delta h = \frac{6}{8,9} = 0,674$. Таким образом обрабатывается вся кривая осциллограммы деформации образца.

Относительная деформация (гр. 9) рассчитывается, как обычно, делением осадки на первоначальную высоту образца:

$\lambda_1 = \frac{0,674}{80} =$ 0,008. Разность давления $(\sigma_1^{\Delta} - \sigma_3)$ получается делением общей нагрузки (Q) на начальную площадь образца.

Гр. 11 заполняется с учетом увеличения площади образца в процессе деформации, для чего давление $(\sigma_1^{\Delta} - \sigma_3)$ делим на $(1 + \lambda_1)$. Используя данные табл. 25, строится график зависимости $\lambda_1 = f(\sigma_1^{\Delta} - \sigma_3)$, по которому соотношением (27) определяется модуль общей деформации, а после испытания серии образцов — и показатели прочности, учитывающие вибродинамический характер воздействия заданной интенсивности.

Таблица 25

Величина ступени нагрузки Δ, МПа	Избыточная вертикальная нагрузка на образец $Q = \Sigma_{A_i}$, МПа	Осадка образца Δh, мм	Относительная вертикальная деформация $\lambda_1 = \frac{\Delta h}{h_0}$	Разность давлений $\sigma_1^{\Delta} - \sigma_3 = Q/E$, МПа	Исправленная разность давления $\sigma_1^{\Delta} - \sigma_3 = \sigma_1^{\Delta} - \sigma_3/1 + \lambda_1$, МПа

7. ОЦЕНКА ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ ГРУНТОВ ОСНОВАНИЙ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ ПРИ ПОДЪЕМЕ УРОВНЯ ГРУНТОВЫХ ВОД

7.1. Подтопление застроенных территорий грунтовыми водами ведет к водонасыщению грунтов оснований, ухудшению их деформационных характеристик и изменению напряженного состояния в сжимаемой толще основания, а в некоторых случаях – и к увеличению размера сжимаемой толщи (H_c).

7.2. Водонасыщение грунтов при подъеме уровня грунтовых вод приводит к дополнительным деформациям оснований, в том числе вследствие дополнительных осадок, так как водонасыщенные грунты по своим деформационным характеристикам часто приближаются к слабым.

7.3. Процесс подъема грунтовых вод вызывает изменение напряженного состояния грунтов оснований вследствие гидростатического и гидродинамического взвешивания.

7.4. При инфильтрации воды из постоянно действующего источника утечек в грунты оснований возникают дополнительные вертикальные нормальные напряжения, значения которых связаны с динамикой продвижения фронта насыщения. Указанные напряжения для зоны, расположенной ниже границы фронта, являются эффективными и вызывают дополнительные осадки.

7.5. Определение осадки грунтов в связи с подъемом уровня грунтовых вод осуществляется методом послойного суммирования. При этом принимается, что на каждый расчетный момент времени осадка достигает конечной величины.

7.6. Поднимающийся уровень грунтовых вод в каждый момент времени разделяет сжимаемую зону на два слоя (водонасыщенный и с естественной влажностью) с различными деформационными характеристиками. Поэтому даже для однородного основания расчет деформаций ведется как для двухслойного. При этом принимается, что сжимаемая толща грунта равна или менее глубины расположения водоупора; в противном случае в расчете необходимо учитывать третий слой. Однако это значительно усложняет расчетную схему для определения функции распределения напряжений по глубине. Поэтому при определении распределения напряжений по глубине основания последнее принимается однослойным, а при определении дополнительной осадки – многослойным.

7.7. Расчет деформации грунтов при идущем подъеме уровня грунтовых вод ведется учитывая относительно малые скорости динамики уровня грунтовых вод ($\leq$ 1,05–1,5 м в год), на основе использования метода смены стационарных положений. В этом случае в каждый выбранный момент времени положение уровня грунтовых вод условно принимается установившимся. Таким образом, рассматривается стационарная

задача напряженного состояния грунта, где время является параметром.

7.8. В качестве основной расчетной схемы принимается случай равномерно распределенной нагрузки без возможности бокового расширения, что соответствует модели компрессионного испытания грунта.

7.9. Последовательность расчета дополнительной осадки при подъеме уровня грунтовых вод следующая.

Для рассматриваемого сооружения, в соответствии со СНиП II-15-74, выполняется расчет распределения сжимающих напряжений P_z по вертикали при первоначальном положении уровня грунтовых вод (h_c), т.е. до его подъема.

Определяется размер сжимаемой зоны H_{oc} графически из условия:

для песчаных и глинистых грунтов – $P_z = 0{,}2\,P_{\sigma z}$ ($P_{\sigma z}$ – природное давление);

для слабых грунтов ($E \leq 5$ МПа) – $P_z = 0{,}1 P_{\sigma z}$.

Затем H_{oc} разбивается на элементарные слои (σ^2) с учетом литологического строения грунтов основания, размера самой H_{oc} и характера эпюры распределения напряжений от нагрузки существующего здания или сооружения, например, $\sigma^2 = 0{,}5$–$1{,}0$ м.

Далее для конкретных гидрогеологических условий участка расположения сооружения, т.е. в заданной точке с координатами (X, Y) на основе решения соответствующей фильтрационной задачи подъема уровня грунтовых вод (Δh) находится функция $\Delta h\,(x, y, t)$. Задаваясь последовательно различными величинами подъема грунтовых вод Δh_i (лучше кратными элементарным слоям от нижней границы H_i), определяется время подъема Δh_i. Для каждого значения Δh_i находится значение H_{ic} с учетом взвешивающего действия поднявшихся грунтовых вод, причем $H_{ic} > H_c$. При этом принимается, что поднимающийся уровень грунтовых вод как бы останавливается и вновь полученная H_{ic} заново разбивается на элементарные слои, но таким образом, чтобы граница одного из слоев совпала с положением уровня грунтовых вод.

Затем для каждого расчетного положения уровня грунтовых вод суммируются осадки слоев, расположенных ниже уровня грунтовых вод (ΔS). На основе полученных расчетов строится график $\Delta S = f(t)$, так как $\Delta h = f(t)$.

7.10. При подъеме уровня грунтовых вод под зданием и сооружением действуют силы, с одной стороны, вызывающие дополнительные сжимающие напряжения в грунте основания, с другой – снижающее их действие. Первая группа сил (на единицу площади). Они вызывают осадки грунтов. Это давление от веса здания и сооружения P_z и от собственного веса грунта $P_{\sigma z}$.

Принимается, что к началу подъема уровня грунтовых вод осадки грунта естественной влажности под действием указанных

сил уже произошли. Дополнительные силы – это силы, возникающие вследствие инфильтрации воды от источника (например, утечка из водонесущих коммуникаций или фильтрационные потери из различных водоемов) P_w, и силы, действие которых связано с образованием техногенных верховодок на плохопроницаемых прослойках P_v. Они вызывают сжимающие напряжения в грунтах, залегающих ниже подошвы указанных прослоек.

Давление от действия сил при инфильтрации определяется по зависимости

$$P_w = M_н \gamma_w l(t), \qquad (38)$$

где $M_н$ – недостаток насыщения (табл. 26); γ_w – плотность воды, кН/м^3 (т/м^3); $l(t)$ – положение фронта продвигающегося вниз замачивания от действующего источника, м, определяемое методом последовательных приближений по формуле

$$l(t) = \frac{k}{M_н} t + (h_0 + h_к) \ln \left[\frac{l(t) + h_0 + h_к}{h_0 + h_к} \right]; \qquad (39)$$

здесь k – коэффициент фильтрации, м/сут; h_0 – напор в источнике, м; $h_к$ – капиллярный вакуум, м.

При достижении фронта замачивания капиллярной каймы $P_w = 0$.

Давление от действия веса воды образовавшихся техногенных верховодок определяется по зависимости

$$P_v = M_н \gamma_w \Delta h_v(t), \qquad (40)$$

где $\Delta h_v(t)$ – положение уровня воды на верховодке на момент времени t, м.

Значение Δh_v определяется на основе соответствующих фильтрационных расчетов или может быть приближенно заменено средней величиной, т.е. $\Delta h(t) \approx \Delta h$. Значение P_v обычно не превышает 0,07 МПа.

Распределение нормальных напряжений σ_{zw} и σ_{zv} в грунте оснований от дополнительных нагрузок P_w и P_v определяется в зависимости от формы источника и верховодки в плане (прямоугольник, круг, полоса и т.д.) по тем же зависимостям, что и от давления фундамента.

Таблица 26

Грунты	Число пластичности	n	e	n_a	M
Глины	>0,17	0,40–0,60	0,67–1,5	0,005–0,05	0,005–0,01
Суглинки	0,07 ≤ I_p < 0,17	0,35–0,50	0,50–1,0	0,05–0,10	0,01–0,05
Супесь	0,01 ≤ I_p < 0,07	0,35–0,45	0,50–0,85	0,10–0,20	0,05–0,15
Пески пылеватые и тонкозернистые	–	0,30–0,40	0,60–0,80	0,10–0,25	0,05–0,20

Вторая группа сил. Они снижают воздействие эффективных напряжений от первой группы. Это давления от гидростатического P_c и гидродинамического P_A взвешивания, которые определяются соответственно по следующим зависимостям:

$$P_{ci} = [(\gamma_s w_e + \alpha_n \gamma_w)(1-n)]\Delta h_i ; \quad (41)$$

$$P_{Az} = \gamma_w I_z z , \quad (42)$$

где γ_s – удельный вес частиц грунта, кН/м^3 (т/м^3); w_c – влажность грунта основания до его замачивания; $\alpha_n = n_a/n$, n_a – активная пористость грунта, n – общая пористость грунта (см. табл. 26); I_z – пьезометрический градиент, $I_z = \partial h(x,y,t)/\partial z$; z – ордината рассматриваемой точки от водоупора; $h(x,z,t)$ – напор в рассматриваемой точке в момент времени t .

Значения P_{Az} при существующих скоростях подъема уровня грунтовых вод, как правило, невелики и ими часто можно пренебречь.

Коэффициент α в (41) введен для учета неполноты взвешивающего действия в глинистых грунтах.

7.11. Расчет деформаций производится для двух основных случаев.

1. Деформации грунтов происходят при существующих нагрузках P_z и $P_{\sigma z}$ только за счет снижения модуля деформации грунтов при их водонасыщении.

Определение дополнительных осадок под действием собственного веса грунта производится по формуле

$$S_{\sigma i} = \beta \sum_1^n \left(\frac{P_{\sigma i} - P_{ci}}{E_2} - \frac{P_{\sigma i}}{E_1} \right) \Delta h_i . \quad (43)$$

Определение дополнительных осадок под действием существующего здания или сооружения производится по формуле

$$S_{P_z i} = \beta \sum_1^t \left(\frac{P_{zi}}{E_2} - \frac{P_{zi}}{E_1} \right) \Delta h_i , \quad (44)$$

где β – коэффициент, зависящий от бокового расширения грунта, $\beta = 0{,}8$ (СНиП II-15-74); P_{ci} – давление от гидростатического взвешивания, определяется по (5.5); E_1 и E_2 – модули деформации грунта соответственно до подтопления (водонасыщения) и после ($E_1 > E_2$); Δh_i – глубина расположения рассматриваемого слоя или расчетного положения уровня грунтовых вод; n – число слоев.

2. Деформации грунтов происходят при возникающих дополнительных нагрузках;

от действия техногенной верховодки

$$S_{vi} = \beta \sum_1^n \frac{P_{vi}}{E_{ki}} \sigma_i , \quad (45)$$

от действия инфильтрующихся вод,

$$S_{wi} = \beta \sum_1^n \frac{P_{wi}}{E_{ki}} , \quad (46)$$

где $P_{vi} = \alpha P_v$ и $P_{wi} = \alpha P_w$ – определяются соответственно по (5.4) и (5.2); E_{ki} – модуль деформации, при расположении слоя выше уровня грунтовых вод $k=1$, ниже – $k=2$; h_i – толщина рассматриваемого слоя; α – коэффициент, учитывающий изменение по глубине z дополнительного давления и принимаемый в зависимости от относительной глубины $2z/B$ (B – ширина фундамента) и формы подошвы, значения α приведены в СНиП II-15-74.

Необходимо иметь в виду, что в процессе строительства или непосредственно после его окончания и дальнейшей эксплуатации сооружения дополнительные давления P_w и P_v и соответственные им осадки могут возникнуть вне всякой связи с поднимающимися грунтовыми водами.

После расчета осадки каждого слоя определяется осадка всей рассматриваемой толщи грунта при данном положении грунтовых вод на соответствующий момент времени.

Принимая затем в качестве расчетного новое положение уровня грунтовых вод, все расчеты деформации грунтов повторяются, и так до достижения грунтовыми водами положения, при котором грунты основания будут полностью подтоплены.

Предложенный метод расчета является приближенным, но удобным для инженерной практики и хорошо увязывается с существующей методикой послойного суммирования деформаций (СНиП П-15-74).

7.12. Учитывая, что насыщение глинистых и органогенных грунтов часто делает последние по своим свойствам слабыми или близкими к ним, то при расчетах дополнительных деформаций должно выдерживаться условие

$$P_\Sigma > P_{стр}, \qquad (47)$$

где $P_\Sigma = P_z + P_v + P_w - P_c$; $P_{стр}$ – структурная прочность сжатия грунта.

7.13. Пример расчета. Ленточный фундамент имеет ширину $B=2$ м, глбина заложения $h_\phi = 2$ м, передаваемая нагрузка от сооружения $P = 0{,}2$ МПа. С поверхности и на всю мощность залегает органо-минеральный ил (грунт не водонасыщен) с удельным весом $\gamma = 16$ кН/м^3 (т/м^3), коэффициентом пористости 0,80; $n = 0{,}42$; с удельным весом частиц грунта $\gamma_s = 26{,}4$ кН/м^3 (т/м^3); влажностью $w_c = 8{,}1$ %; $E_1 = 8{,}0$ МПа (кг/см^2) (до замачивания), $n_a = 0{,}1$; $E_2 = 40$ МПа (кг/см^2) (после замачивания).

Территория площадки является потенциально подтопляемой; пласт однослойный, неограниченный в плане, естественный уровень (до строительства) находился на глубине 11 м от подошвы фундамента, мощность грунтовых вод $h_e = 5{,}0$ м, т.е. водоупор находится на глубине 16 м, возможная величина дополнительной инфильтрации в виде полосы шириной $L = 100$ м составляет $W_0 = 1 \cdot 10^{-4}$ м/сут, коэффициент фильтрации $K = 0{,}2$ м/сут, коэффициент водоотдачи $\mu = 0{,}05$.

При указанных гидрогеологических условиях подъем уровня грунтовых вод рассчитывается по следующей зависимости (Рекомендации по прогнозам подтопления промышленных площадок грунтовыми водами. М., ВНИИВОДГЕО, 1976, 324 с.):

$$\Delta h = \frac{2W_0 L}{k}\tau\left[\frac{1}{2} - 2\,\mathrm{ierfc}\,\frac{1}{2\sqrt{\tau\bar{h}_{cp}}}\right], \qquad (48)$$

где $\tau = \frac{kt}{\mu L}$, $\bar{h}_{cp} = h_{cp}$, $h_{cp} \approx h_e$; t – время, в течение которого осуществляется подъем уровня.

Необходимо оценить возможные деформации сооружения в зависимости от снижения деформативных свойств грунтов при их водонасыщении поднимающимися грунтовыми водами. Отдельно определяем дополнительные деформации от собственного веса грунта и от сооружения.

Решение. Определяется давление по оси ленточного фундамента от здания с учетом $h_ф$=2,0 м.

$P_o = P - P_{\sigma}$=0,20 – 16·2·10^{-3} = 0,168 МПа (кг/см^2).

Далее производится разбивка толщи основания ниже подошвы фундамента через 1,0 м и для середины каждого слоя определяются P_{oz} и $P_{\sigma z}$ (табл. 27, гр.5 и 6). Нижняя граница сжимаемой зоны H_{oc} до подъема уровня грунтовых вод в данном случае составляет H_{oc} = 10,5 м.

Задаемся величиной подъема уровня грунтовых вод, равным 3,0 м, что произойдет для приведенных гидрогеологических условий через t = 1538 сут. [по формуле (48)]. После подъема определяется новая величина H_c=10,8 м (при этом $\gamma_{вав}(\gamma_s - \alpha\gamma_w)\times(1 - n)$ = (26,4 – 0,25 · 10) (1 – 0,42) = 13,4 кН/м^3 (т/м^3);

$\alpha = \frac{0,1}{0,42} \approx 0,25.$

Далее определяется величина P_c для каждого из трех нижних слоев (9–11 табл. 27) по зависимости (41). Так, для слоя 9 P_c = [26,4 (1 – 0,42) · 0,081 + 0,25 · 10 (1 – 0,42)] 0,50 = = 0,0013 МПа. Затем определяется новое значение $P'_{\sigma z} = P_{\sigma z} - P_{cz}$.

Определяем размеры послойной деформации для слоев:

Слой 9 $S_{c9} = 0,8\left(\frac{0,167 - 0,0013}{4} - \frac{0,167}{8}\right)0,5 = 8,5$ мм.

Слой 10 $S_{c10} = 0,8\left(\frac{0,180 - 0,0039}{4} - \frac{0,180}{8}\right)1,0 = 17,6$ мм.

Слой 11 $S_{c11} = 0,8\left(\frac{0,193 - 0,0065}{4} - \frac{0,193}{8}\right)1,0 = 18$ мм.

Таким образом, при первом расчетном положении уровня грунтовых вод происходит дополнительная суммарная осадка,

Таблица 27

№ слоя	Глубина от подошвы фундамента до середины слоя z, м	$m = 2z/b$	α	P_{0z}, МПа (кг/см²)	$P_{\sigma_{sz}} = \gamma(h_\phi + z)$, МПа (кг/см²)	P_{σ_z} при уровне грунтовых вод $z_{угв} = 8$ м	P_{σ_z} при уровне грунтовых вод $z_{угв} = 5$ м	P_{σ_z} при уровне грунтовых вод $z_{угв} = 2$ м	P_{σ_z} при уровне грунтовых вод $z_{угв} = 0$ м	Расчетные положения уровней грунтовых вод от подошвы фундамента, м
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
0	0,0	0,0	1,0	0,168	0,032	0,032	0,032	0,032	0,032	0,0
–	0,25	0,25	0,986	0,1656	0,036	–	–	–	0,036	–
1	0,5	0,5	0,953	0,162	0,040	0,040	0,040	0,040	0,0393	–
2	1,5	1,5	0,670	0,124	0,056	0,056	0,056	0,056	0,0527	–
–	2,0*	2,0	0,550	0,0924	0,064	–	–	0,064	–	2,0
3	2,5	2,5	0,463	0,078	0,072	0,072	0,072	0,0707	0,0661	–
4	3,5	3,5	0,346	0,059	0,088	0,088	0,088	0,0841	0,0795	–
5	4,5	4,5	0,274	0,0465	0,104	0,104	0,104	0,0975	0,0929	–
–	5,0*	5,0	0,248	0,0416	0,112	0,112	0,112	–	–	5,0
6	5,5	5,5	0,227	0,0386	0,120	0,120	0,1187	0,1109	0,1053	–
7	6,5	6,5	0,193	0,0327	0,136	0,136	0,1321	0,1243	0,1187	–
8	7,5	7,5	0,169	0,0287	0,152	0,152	0,1454	0,1377	0,1321	–
–	8,0*	8,0	0,158	0,0266	0,160	0,160	–	–	–	8,0
9	8,5	8,5	0,148	0,0252	0,168	0,1667	0,1588	0,1511	0,1455	–
10	9,5	9,5	0,133	0,0226	0,184	0,1801	0,1722	0,1645	0,1589	–
11	10,5	10,5	0,120	0,0202	0,200	0,1935	0,1856	0,1779	0,1723	–
–	11,0*	11,0	0,114	0,0191	0,208	0,2002	0,1923	0,1848	0,1780	11
12	11,5	11,5	0,109	0,0189	0,2147	0,2069	0,1990	0,1903	0,1857	–
–	–	–	–	–	–	–	–	0,2037	0,1981	–

* Расчетное положение уровня грунтовых вод.

равная $\Sigma S = 8{,}5$ мм + 17,6 мм + 18 мм $\approx 44{,}1$ мм, которая произойдет через 1538 сут.

Затем принимается новое расчетное значение подъема уровня грунтовых вод, еще на 3,0 м, т.е. уже на 6,0 м, и он находится на 5,0 м от подошвы фундамента. Для рассматриваемых в примере условий это произойдет через 5000 сут. Новая H_c составит 11,3 м, т.е. сжимаемая зона увеличится на 0,3 м.

Определяется снова величина дополнительной осадки по отдельным вновь замоченным слоям:

Слой 6 $$S_{c6} = 0{,}8\left(\frac{0{,}119 - 0{,}0013}{4} - \frac{0{,}119}{8}\right)0{,}5 = 5{,}8 \text{ мм}.$$

Слой 7 $$S_{c7} = 0{,}8\left(\frac{0{,}132 - 0{,}0039}{4} - \frac{0{,}132}{8}\right)1{,}0 = 12{,}0 \text{ мм}.$$

Слой 8 $$S_{c8} = 0{,}8\left(\frac{0{,}145 - 0{,}0065}{4} - \frac{0{,}145}{8}\right)1{,}0 = 13{,}2 \text{ мм}.$$

$\Delta S = 5{,}8$ мм + 12,0 мм + 13,2 мм = 31,0 мм.

Принимаем новое расчетное положение уровня грунтовых вод, т.е. последние будут находиться на 2,0 м от подошвы фундамента. Этот подъем уровня (также на 3 м) произойдет уже через 11250 сут. Новая $H_c = 11{,}45$ м.

Определяется величина дополнительной осадки по отдельным вновь замоченным слоям:

Слой 3 $$S_{c3} = 0{,}8\left(\frac{0{,}071 - 0{,}0013}{4} - \frac{0{,}071}{8}\right)0{,}50 = 3{,}4 \text{ мм}.$$

Слой 4 $$S_{c4} = 0{,}8\left(\frac{0{,}084 - 0{,}0039}{4} - \frac{0{,}084}{8}\right)1{,}0 = 7{,}6 \text{ мм}.$$

Слой 5 $$S_{c5} = 0{,}8\left(\frac{0{,}097 - 0{,}0065}{4} - \frac{0{,}097}{8}\right)1{,}0 = 8{,}4 \text{ мм}.$$

$\Delta S = 3{,}6$ мм + 8,0 мм + 9,2 мм $\approx 20{,}8$ мм.

Принимаем новое расчетное положение уровня грунтовых вод, при котором происходит дальнейший подъем уровня еще на 2,0 м (через 17500 сут), фундамент подтопляется. Новая $H_c = 11{,}70$ м.

Определяем величину дополнительной осадки по отдельным вновь замоченным слоям:

Слой 1 $$S_{c1} = 0{,}8\left(\frac{0{,}039 - 0{,}0007}{4} - \frac{0{,}039}{8}\right)0{,}5 = 1{,}9 \text{ мм}.$$

Слой 2 $$S_{c2} = 0{,}8\left(\frac{0{,}053 - 0{,}0039}{4} - \frac{0{,}053}{8}\right)1{,}0 = 4{,}5 \text{ мм}.$$

$\Delta S = 1{,}9$ мм + 4,5 мм = 6,4 мм.

Общий размер осадки составит 102,2 мм.

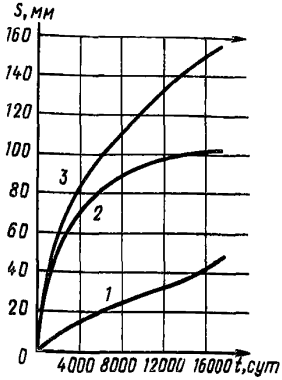


Рис.32. Кривые зависимостей: $1 - S_e = f(t)$; $2 - S_p = f(t)$; $3 - S_e + S_p f(t)$

На основе полученных результатов строится график $S_c = f(t)$ (рис. 32, кривая *1*) и определяется характер протекания осадок во времени.

Расчет дополнительных осадок от веса сооружения

Слой 11 $S_{p11} = 0{,}8\left(\frac{0{,}0202}{4} - \frac{0{,}0202}{8}\right)1{,}0 = 2{,}02$ мм.

Слой 10 $S_{p10} = 0{,}8\left(\frac{0{,}0226}{4} - \frac{0{,}0226}{8}\right)1{,}0 = 2{,}26$ мм.

Слой 9 $S_{p9} = 0{,}8\left(\frac{0{,}0252}{4} - \frac{0{,}0252}{8}\right)0{,}5 = 1{,}2$ мм.

Слой 8 $S_{p8} = 0{,}8\left(\frac{0{,}0287}{4} - \frac{0{,}0287}{8}\right)1{,}0 = 2{,}87$ мм.

Слой 7 $S_{p7} = 0{,}8\left(\frac{0{,}0327}{4} - \frac{0{,}0327}{8}\right)1{,}0 = 3{,}27$ мм.

Слой 6 $S_{p6} = 0{,}8\left(\frac{0{,}0386}{4} - \frac{0{,}0386}{8}\right)0{,}5 = 1{,}93$ мм.

Слой 5 $S_{p5} = 0{,}8\left(\frac{0{,}0465}{4} - \frac{0{,}0465}{8}\right)1{,}0 = 4{,}65$ мм.

Слой 4 $S_{p4} = 0{,}8\left(\frac{0{,}0590}{4} - \frac{0{,}0590}{8}\right)1{,}0 = 5{,}9$ мм.

Слой 3 $S_{p3} = 0{,}8\left(\frac{0{,}0780}{4} - \frac{0{,}0780}{8}\right)0{,}5 = 3{,}9$ мм.

Слой 2 $S_{p2} = 0{,}8\left(\frac{0{,}1240}{4} - \frac{0{,}1240}{8}\right)1{,}0 = 12{,}4$ мм.

Слой 1 $S_{p1} = 0{,}8\left(\frac{0{,}1620}{4} - \frac{0{,}1620}{8}\right) 0{,}5 = 8{,}1$ мм.

Общий размер осадки составляет 48,5 мм.

На основе полученных результатов строится график $S_p = f(t)$ (рис. 32, кривая *2*). Из сравнения двух графиков следует, что для рассматриваемого случая размеры осадок от действия собственного веса значительно превосходят осадки от сооружения. Изменение осадок во времени носит затухающий характер.

На рис. 32 приведена также зависимость суммарной осадки $S = S_c + S_p$ от времени (кривая *3*).

Суммарная осадка на расчетные периоды времени соответственно составляет: через 1538 сут ≈ 50,0 мм, 5000 сут ≈ 90,7 мм, 11250 сут – 125,0 мм и 17500 сут – 152,0 мм.

Полученные размеры осадок следует считать несколько завышенными, так как расчет велся для их предельных значений.

Расчет деформаций при учете одновременного действия P_z, P_{cz} и $P_{\sigma z}$ должен вестись по зависимости

$$S = 0{,}8\left(\frac{P_z + P_{\sigma z} - P_c}{E_2} - \frac{P_z + P_{\sigma z}}{E_1}\right)\Delta h_i. \qquad (49)$$

После определения параметров всех девяти видов зависимостей программа выбирает уравнение с минимальным остаточным среднеквадратичным отклонением и приводит его как окончательный результат.

Подготовка исходных данных

Число наблюдений (k) в массиве набивается по формату I_i 3 на отдельной карте (с первой позиции). Значения x и y набиваются отдельными массивами по формату F 8.3 по десяти наблюдений на карте (с первой позиции).

Колода исходных данных формируется в следующем порядке: k_1, массив x_1, массив y_1, ..., k_i, массив x_i, массив y_i, ..., k_n, массив x_n, массив y_n, /*, //.

Количество массивов исходных данных не ограничено. Количество значений в одном массиве не должно превышать 300 значений.

Комплектование загрузочного модуля

Загрузочный модуль состоит из исходной колоды программы и подпрограмм, затем следует табличный материал (критерий Стьюдента) и колода исходного материала.

Выдача результатов на печать

Печать результатов начинается с заглавия "Новый массив" с количеством наблюдений "k".

Затем печатаются введенные значения исходных x и y и номера наблюдений, отбракованных по критерию ("Отбраковка №..."). XSR, YSR, DSX, DSY – средние и среднеквадратичные отклонения, соответственно x и y (после отбраковки).

Далее идет выпечатывание номера и коэффициентов уравнения, остаточного среднеквадратичного отклонения. Кроме того, по каждому уравнению печатаются значения $\hat{y}$, вычисленные по полученной формуле.

Затем программа печатает окончательные результаты: коэффициенты, остаточное среднеквадратичное отклонение и номер уравнения, для которого остаточное отклонение минимально, и вычисленные по этому уравнению значения $\hat{y}$ для построения графика.

ПРИЛОЖЕНИЕ

ИНСТРУКЦИЯ К ПОЛЬЗОВАНИЮ ПРОГРАММОЙ "ВЫБОР НАИЛУЧШЕЙ АППРОКСИМАЦИИ ДЛЯ ОПИСАНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО МАТЕРИАЛА ПАРНОЙ ЗАВИСИМОСТЬЮ "ГРАФИК"

Программа ГРАФИК предназначена для нахождения наилучшего вида аппроксимации, описывающей парную зависимость. Программа написана для ЕС-1022 на языке ФОРТРАН в системе ОС. Она определяет параметры (коэффициенты уравнения и остаточное среднеквадратичное отклонение) для следующих девяти наиболее широко применяемых видов аппроксимаций:

1. $y = Ax + B$
2. $y = A\lg x + B$
3. $y = \frac{A}{x} + B$
4. $y = Ax^B$
5. $y = Ax^2 + Bx + C$
6. $y = A\lg^2 x + B\lg x + C$
7. $y = \frac{1}{Ax^2 + Bx + C}$
8. $y = Ae^{Bx} + C$
9. $y = Ax^B + C$

```
//GRAFIK JOB 'ЙЙРЧЕНКО',MSGLEVEL=1,REGION=150K
// EXEC FORTGCLG
//FORT.SYSIN DD *
      DIMENSION X(300),Y(300),NM(39),NU(39),YRZ(300),YREZ(300),XRL(300),
     *XR(300),YR(300),YREZ(300)
      DIMENSION YC(300)
      COMMON/IRA/X,Y
      REAL JREZ
      REAL NU
      READ (5,1)M
    1 FORMAT (I3)
      READ (5,3)(NM(J),J=1,M)
      READ (5,4)(NU(J),J=1,M)
    3 FORMAT (20I4)
    4 FORMAT (16F5.2)
  501 READ (5,1,END=500)K
      READ (5,2)(X(I),I=1,K)
      READ (5,2)(Y(I),I=1,K)
      WRITE (6,900)K
  900 FORMAT(/T40,'Н О В Ы Й  М А С С И В   K= ',I3/)
    2 FORMAT (10F8.6)
      WRITE (6,8)(X(I),I=1,K)
      WRITE (6,8)(Y(I),I=1,K)
    8 FORMAT (10F10.3)
      CALL BRAK (X,K,NM,NU,M)
      CALL BRAK (Y,K,NM,NU,M)
      SJM1=0
      SJM2=0
      SJM3=0
      SJM4=0
      DO 101 I=1,K
      SJM1=SUM1+X(I)
  101 SJM2=SUM2+Y(I)
      XSR=SUM1/K
      YSR=SUM2/K
      DO 102 I=1,K
      SJM3=SUM3+(X(I)-XSR)**2
  102 SJM4=SUM4+(Y(I)-YSR)**2
      DSX=SQRT(SUM3/(K-1))
      DSY=SQRT(SUM4/(K-1))
      WRITE (6,10)XSR,YSR,DSX,DSY
   10 FORMAT (T10,'XSR=',E12.5,5X,'YSR=',E12.5,5X,'DSX=',E12.5,5X,'DSY='
     *,E12.5/)
      N=1
      CALL MK (X,Y,K,N,A1,B1,DISR,YREZ)
      A=A1
      B=B1
      DISM=DISR
      NOM=N
      DO 110 I=1,K
      YRZ(I)=YREZ(I)
      IF(X(I).GT.0.) GO TO 70
      XRL(I)=0.
      GO TO 110
   70 XRL(I)=ALOG10(X(I))
  110 CONTINUE
      N=2
      CALL MK (XRL,Y,K,N,A1,B1,DISR,YREZ)
      IF (DISM.LE.DISR) GO TO 150
      A=A1
      B=B1
      DISM=DISR
      NOM=N
      DO 111 I=1,K
  111 YRZ(I)=YREZ(I)
  150 DO 112 I=1,K
  112 XR(I)=1/X(I)
      N=3
      CALL MK (XR,Y,K,N,A1,B1,DISR,YREZ)
      IF (DISM.LE.DISR) GO TO 151
      A=A1
      B=B1
      DISM=DISR
      NOM=N
      DO 113 I=1,K
  113 YRZ(I)=YREZ(I)
  151 DO 114 I=1,K
```

```
      XR(I)=ALOG(X(I))
  114 YR(I)=ALOG(Y(I))
      N=4
      CALL MK (XR,YR,W,N,A1,B1,DISR,YREZ)
      A4=EXP(B1)
      B4=A1
      SUM5=0
      DO 115 I=1,K
      W=B4*ALOG(X(I))
      YREZ(I)=A4*EXP(W)
  115 SUM5=SUM5+(YREZ(I)-Y(I))**2
      DIS4=SQRT(SUM5/(K-2))
      WRITE(6,28)(YREZ(I),I=1,K)
   28 FORMAT(' ',1PE12.5)
      WRITE (6,29)A4,B4,DIS4,N
   29 FORMAT (/10,'A=',E12.5,5X,'B=',F12.5,5X,'DIS=',F12.5,5X,'NOM=',I3)
      IF(DISM.LE.DIS4) GO TO 152
      A=A4
      B=B4
      DISM=DIS4
      NOM=N
      DO 116 I=1,K
  116 YRZ(I)=YREZ(I)
  152 N=5
      CALL MNK (X,Y,K,AM,BM,CM,JREZ,DISP,JRI,N)
      IF (DISM.LE.DISP) GO TO 153
      A=AM
      B=BM
      C=CM
      DISM=DISP
      NOM=N
      DO 117 I=1,K
      RAB=JREZ(I)
  117 YRZ(I)=RAB
  153 N=6
      CALL MNK (XRL,Y,K,AM,BM,CM,JREZ,DISP,JRI,N)
      IF (DISM.LE.DISP) GO TO 154
      A=AM
      B=BM
      C=CM
      DISM=DISP
      NOM=N
      DO 118 I=1,K
  118 YRZ(I)=JREZ(I)
  154 DO 119 I=1,K
  119 YR(I)=1/Y(I)
      N=7
      CALL MNK (X,YR,K,AM,BM,CM,JREZ,DISP,JRI,N)
      SUM7=0
      DO 121 I=1,K
  121 SUM7=SUM7+(YREZ(I)-Y(I))**2
      DISP=SQRT(SUM7/(K-2))
      WRITE (6,24)DISP
   24 FORMAT(' ',1F9.4)
      IF (DISM.LE.DISP) GO TO 155
      A=AM
      B=BM
      C=CM
      DISM=DISP
      NOM=N
      DO 120 I=1,K
  120 YRZ(I)=JREZ(I)
  155 L=K-1
  141 DO 140 I=1,L
      IF (X(I).LE.X(I+1)) GO TO 140
      RAB=X(I)
      RAB1=Y(I)
      X(I)=X(I+1)
      Y(I)=Y(I+1)
      X(I+1)=RAB
      Y(I+1)=RAB1
      GO TO 141
  140 CONTINUE
```

```
151           XB=(X(1)+X(K))/2
152           WRITE (6,8)(X(I),I=1,K)
153           WRITE (6,8)(Y(I),I=1,K)
154           N=K
155           CALL POISK (X,Y,K,L,XB,YC,C1,N,BISB,MIN)
156           DO 412 I=1,K
157       412 YR(I)=ALOG(YC(I))
158           CALL MK (X,YR,K,N,A1,B1,DISR,YREZ)
159           AB=EXP(B1)
160           BB=A1
161           SUM7=0
162           DO 413 I=1,K
163           V=A1+X(I)
164           YREZ(I)=AB*EXP(V)+C1
165       413 SUM7=SUM7+(Y(I)-YREZ(I))**2
166           DISR=SQRT(SUM7/(K-3))
167           WRITE (6,40)AB,BB,C1,DISR
168        40 FORMAT (/10,'A1=',E12.5,5X,'B1=',E12.5,5X,'C1=',E12.5,5X,'SIGR=',F
169          *12.5/)
170           IF (DISM.LE.DISR) GO TO 156
171           A=AA
172           B=BB
173           C=C1
174           DISM=DISR
175           NOM=N
176           DO 130 I=1,K
177       130 YR2(I)=YREZ(I)
178       156 N=0
179           XB=SQRT(X(1)*X(K))
180           CALL POISK (X,Y,K,L,XB,YC,C1,N,BISR,MIN)
181           DO 414 I=1,K
182           YR(I)=ALOG(YC(I))
183       414 XR(I)=ALOG(X(I))
184           CALL MK (XR,YR,K,N,A1,B1,DISR,YREZ)
185           A9=EXP(B1)
186           B9=A1
187           SUM8=0
188           DO 415 I=1,K
189           G=A9*ALOG(X(I))
190           YREZ(I)=A9*EXP(G)+C1
191       415 SUM8=SUM8+(YREZ(I)-Y(I))**2
192           DISR=SQRT(SUM8/(K-3))
193           WRITE (6,40)A9,B9,C1,DISR
194           IF (DISM.LE.DISR) GO TO 157
195           A=A9
196           B=B9
197           C=C1
198           DISM=DISR
199           NOM=N
200           DO 416 I=1,K
201       116 YR2(I)=YREZ(I)
202       157 WRITE (6,25)
203        25 FORMAT (/55,'ОКОНЧАТЕЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ'//)
204           WRITE (6,26) A,B,C,DISM,NOM
205        26 FORMAT (/10,'A=',F12.5,5X,'B=',F12.5,5X,'C=',E12.5,5X,'DISM=',F12.
206          *5,5X,'NOM=',I3//)
207           WRITE (6,27)(YR2(I),I=1,K)
208        27 FORMAT (' ',10F8.4
209           GO TO 501
210       500 STOP
211           END
212           SUBROUTINE BRAK (T,K,NN,NU,M)
213           DIMENSION T(300),NN(30),NU(30),NOP(300)
214           DIMENSION X(300),Y(300)
215           COMMON/IRA/X,Y
216           REAL NU,T
217           SUMT=0
218           DO 104 I=1,K
219       104 SUMT=SUMT+T(I)
220           TSR=SUMT/K
221           SUM=0
```

```
222           DO 105 I=1,K
223       105 SUM=SUM+(Y(I)-YSR)**2
224           STT=SQRT(SUM/(K-1))
225           DO 108 J=1,M
226           IF (NM(J).LE.K) GO TO 108
227           NJR=NU(J)+((K-NM(J))/(NM(J)-NM(J-1)))*(NU(J)-NU(J-1))
228           GO TO 200
229       108 CONTINUE
230       200 RAR2=NJR*STT
231           K1=K
232           DO 106 I=1,K1
233       106 RAR1=ABS(YSR-Y(I))
234           IF (RAR1.LT.RAR2) GO TO 105
235           WRITE (6,27)I
236        27 FORMAT (1X,'ТОЧКА',I3//)
237           IF (I.NE.K) GO TO 202
238           K=K-1
239           GO TO 203
240       202 I0=I
241           J=K-1
242           DO 201 I2=I0,J
243           X(I2)=X(I2+1)
244       201 Y(I2)=Y(I2+1)
245           K=K-1
246       105 CONTINUE
247       203 RETURN
248           END
249           SUBROUTINE MNK (XSR,JSR,K,AM,BM,CM,JREZ,DISP,JR1,N)
250           DIMENSION XSR(300),JSR(300)
251           DIMENSION JREZ(300),JR(300)
252           REAL JSR,JREZ,JR1
253           DOUBLE PRECISION AF,BF,CF,DF,EF,FF,KF,DELTA,AM,BM,CM
254           МЕТОД НАИМЕНЬШИХ КВАДРАТОВ
255           AF=0
256           BF=0
257           CF=0
258           DF=0
259           EF=0
260           FF=0
261           KF=0
262           DO 201 I=1,K
263           AF=AF+XSR(I)
264           BF=BF+XSR(I)**2
265           CF=CF+XSR(I)
266           DF=DF+XSR(I)**3
267           EF=EF+XSR(I)*JSR(I)
268           FF=FF+XSR(I)**4
269       201 KF=KF+XSR(I)*XSR(I)*JSR(I)
270           DELTA=K*BF*FF+2*AF*BF*DF-BF**3-DF**2*K-AF*AF*FF
271           AM=(K*BF*KF+AF*BF*DF+AF*BF*EF-BF*BF*CF-AF*AF*KF-K*DF*EF)/DELTA
272           BM=(K*EF*FF+AF*BF*KF+AF*CF*FF-BF*BF*EF-AF*CF*FF-K*DF*KF)/DELTA
273           CM=(BF*CF*FF+BF*CF*EF+AF*DF*KF-BF*BF*KF-AF*EF*FF-FF*DF*DF)/DELTA
274           SUM5=0
275           DO 305 I=1,K
276       305 JREZ(I)=AM*XSR(I)*XSR(I)+BM*XSR(I)+CM
277           IF(N.NE.7) GO TO 308
278           DO 306 I=1,K
279           JSR(I)=1/JSR(I)
280       306 JREZ(I)=1/JREZ(I)
281       308 DO 307 I=1,K
282       307 SUM5=SUM5+(JREZ(I)-JSR(I))**2
283           DISP=SQRT(SUM5/(K-3))
284           WRITE (6,60)
285        60 FORMAT (' ',17(1H* ),' M N K ',17(1H* )/)
286           WRITE (6,29)AM,BM,CM,N,DISP
287        29 FORMAT (1X,'AM=',D13.6,5X,'BM=',D13.6,5X,'CM=',D13.6,5X,'NOM=',I
              *,5X,'DISP=',F12.5)
288           WRITE (6,40)(JREZ(I),I=1,K)
289        40 FORMAT (' ',10F8.4)
290           RETURN
291           END
292           SUBROUTINE MK (XR,YR,K,N,A1,B1,DISR,YREZ)
293
```

```
      DIMENSION XR(300),YR(300),YREZ(300)
      AR=0
      BR=0
      CR=0
      DR=0
      DO 130 I=1,K
      AR=AR+XR(I)
      BR=BR+YR(I)
      CR=CR+XR(I)*YR(I)
  130 DR=DR+YR(I)*XR(I)
      DEL=K*DR-AR*AR
      WRITE (6,62)
   62 FORMAT (' ',20('*  '),'M K ',20('*  ')/)
      B1=(DR*BR-AR*CR)/DEL
      A1=(K*CR-AR*BR)/DEL
      SUM=0
      DO 131 I=1,K
  131 YREZ(I)=A1*XR(I)+B1
      DO 132 I=1,K
  132 SUM=SUM+(YREZ(I)-YR(I))**2
      DISR=SQRT(SUM/(K-2))
      WRITE (6,20)A1,B1,DISR,N
   20 FORMAT (T10,'A=',E12.5,5X,'B=',E12.5,5X,'DIS=',E12.5,5X,'NOM=',I3)
  701 WRITE (6,27)(YREZ(I),I=1,K)
   27 FORMAT (' ',10F8.4)
      RETURN
      END
      SUBROUTINE POISK (X,Y,K,L,XS,YC,C1,N,*,MIN)
      DIMENSION X(300),Y(300),YC(300)
      DO 142 I=1,L
      IF (XS.GE.X(I).AND.XS.LE.X(I+1)) GO TO 143
  142 CONTINUE
  143 IR=I
      YS=(Y(IR+1)-Y(IR))/(X(IR+1)-X(IR))*(XS-X(IR))+Y(IR)
      C1=(Y(1)*Y(K)-YS*YS)/(Y(1)+Y(K)-2*YS)
      IPR=0
      DO 144 I=1,K
      YC(I)=Y(I)-C1
      IF (YC(I).GT.0) IPR=IPR+1
  144 CONTINUE
      IF (IPR.EQ.0) GO TO 400
      IF (IPR.EQ.K) GO TO 410
      WRITE (6,41)N
   41 FORMAT (T10,'NOM ',I3,' HEBOSMOWHO'/)
      RETURN1
  400 MIN=1
  410 DO 411 I=1,K
  411 YC(I)=ABS(YC(I))
      RETURN
      END
```

СОДЕРЖАНИЕ

Стр.

Предисловие 3
1. Общие положения 6
Неблагоприятное влияние подтопления на грунты застроенных территорий 8
2. Инженерно-геологические условия Среднего Приобья и их изменение в ходе промышленно-хозяйственного освоения 8
Геологическое строение и гидрогеологические условия 8
Инженерно-геологические особенности грунтов 16
Влажностный режим грунтов и его изменение при застройке территорий 30
Влияние подтопления на физико-механические свойства грунтов . . . 38
Методика оценки инженерно-геологических свойств структурно-неустойчивых грунтов и прогноза их поведения в условиях подтопления. 49

3. Закономерности изменения состава и физико-механических свойств грунтов при подтоплении их грунтовыми водами 49
4. Состав исследований на различных этапах изысканий 53
5. Оценка изменения характеристик физико-механических свойств в условиях подтопления по результатам статистической обработки данных 57
Обработка данных по свойствам глинистых и пылеватых грунтов, не содержащих органического вещества 59
Обработка данных по свойствам органо-минеральных грунтов 66
Прогноз изменения деформационных и прочностных свойств органо-минеральных грунтов при их водонасыщении 69
6. Оценка изменения физико-механических свойств грунтов при их подтоплении экспериментальным методом 70
Определение вещественного состава грунтов 72
Определение органических веществ 74
Ускоренный метод определения группового состава органического вещества по модификации Кононовой и Бельчиковой 75
Определение реакционноспособных форм железа в 3,5н растворе H_2SO_4 78
Определение состава солей 80
Определение катионообменной способности грунтов 82
Определение обменных катионов по методу Пфеффера в модификации Молодцова и Игнатовой 83
Определение физических свойств 84
Определение дисперсности грунтов 87
Определение механических свойств грунтов и оценка их изменения в условиях подтопления 89
Определение параметров консолидации при одномерном сжатии . . . 91
Проведение испытания 93
Определение величины фильтрационной и вторичной консолидации . 95
Определение коэффициента консолидации по логарифмическому методу А.Казагранде 95
Метод квадратных корней из времени Д. Тейлора 96

Стр.

Определение коэффициента вторичной консолидации C_{α} 97
Интегральный метод определения параметров одномерной консолидации 97
Краткое описание программы 103
Пример расчета 105
Компрессионные испытания грунтов, не проявляющих при подтоплении просадочных деформаций и набухания 107
Схемы испытаний 110
Компрессионные испытания просадочных грунтов 113
Компрессионные испытания набухающих грунтов 118
Оценка изменения прочностных свойств грунтов при подтоплении . . 122
Проведение испытания на одноплоскостных срезных приборах 122
Проведение испытаний в условиях трехосного сжатия 125
Определение показателей механических свойств грунтов при вибродинамических воздействиях 128
Конструкция вибростабилометра, порядок подготовки его к работе 131
Порядок испытания и пример обработки вертикальной деформации образца и изменения бокового давления в камере стабилометра 134
7. Оценка дополнительных деформаций грунтов оснований зданий и сооружений при подъеме уровня грунтовых вод 136
Приложение. Инструкция к пользованию программой "Выбор наилучшей аппроксимации для описания экспериментального материала парной зависимостью ГРАФИК" 146

ПНИИИС
Госстроя СССР

Рекомендации
по методике прогноза изменения строительных свойств структурно-неустойчивых грунтов при подтоплении

Редакция инструктивно-нормативной литературы
Зав. редакцией Л. Г. Балъян
Редактор Н. А. Шатерникова
Мл. редактор Л. И. Месяцева
Технический редактор Т.И. Полюшкина
Корректор Т. Г. Бросалина
Н/К

Подписано в печать 10.12.84. Т-18007. Формат 84x108/32. Бумага офсетная №2. Набор машинописный. Печать офсетная. Усл.печ.л. 8,19. Усл.кр.-отт. 8,40. Уч.-изд.л. 9,43. Тираж 5000 экз. Изд.№ XII-465. Зак.№ 822 Цена 45 коп.

Стройиздат, 101442, Москва, Каляевская, 23а
Тульская типография Союзполиграфпрома при Государственном комитете СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли г. Тула, пр. Ленина, 109

gost.e-ecolog.ru